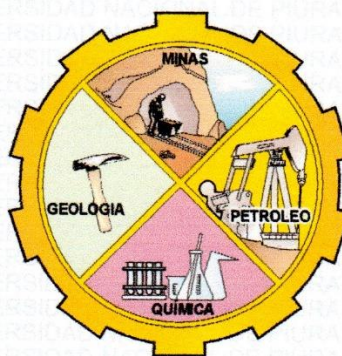


UNIVERSIDAD NACIONAL DE PIURA

Facultad de Ingeniería de Minas

Escuela Profesional de Ingeniería de Petróleo



TESIS

**“EFICIENTE REMOCIÓN DE LODOS PARA ASEGURAR UN EXITOSO
TRABAJO DE CEMENTACIÓN EN CAMPOS MARGINALES”**

Presentada Por:

Br. PABLO MANUEL VILCHEZ CASTILLO

**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE
INGENIERO DE PETRÓLEO**

Línea de Investigación:

Lodos de Perforación y Cementación de Pozos.

PIURA - PERÚ

AÑO 2019

DECLARACIÓN JURADA

DE ORIGINALIDAD DE TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

Yo, **Vílchez Castillo Pablo Manuel**, identificado con **DNI N° 76753598**, en la condición de Bachiller de la Facultad de Minas de la Escuela Profesional de Petróleo, domiciliado en Calle Manuel Sullón Mz. F 10 Lote 22, Distrito de Veintiséis de Octubre, Provincia de Piura Departamento de Piura, celular 926532683, email pvilchezcastillo@gmail.com

DECLARO BAJO JURAMENTO: que el trabajo de investigación que presento a la Oficina Central de Investigación (OCIN), es original, no siendo copia parcial ni total de un trabajo de investigación desarrollado, y/o realizado en el Perú o en el extranjero, en caso de resultar falsa la información que proporciono, me sujeto a los alcances de lo establecido en el art. N° 411, del código penal concordante con el Art. 32° de la Ley N° 27444, y Ley del Procedimiento Administrativo General y las Normas Legales de Protección a los Derechos de Autor.

En fe de lo cual firmo la presente.

Piura, 16 de Agosto del 2019



VÍLCHEZ CASTILLO PABLO MANUEL
DNI N° 76753598

ARTÍCULO 411.- El que, en un procedimiento administrativo, hace una falsa declaración en relación a hechos o circunstancias que le corresponde probar, violando la presunción de veracidad establecida por ley, será reprimido con pena privativa de libertad no menos de uno ni mayor de cuatro años.

Art. 4 Inciso 4.12 del reglamento del Registro Nacional de Trabajos de Investigación para optar grados académicos y títulos profesionales – RENATI Resolución de Consejo Directivo N° 033-2016-SUNEDU/CD

UNIVERSIDAD NACIONAL DE PIURA
Facultad de Ingeniería de Minas
Escuela Profesional de Ingeniería de Petróleo



TESIS

**“EFICIENTE REMOCIÓN DE LODOS PARA ASEGURAR UN EXITOSO
TRABAJO DE CEMENTACIÓN EN CAMPOS MARGINALES”**

**PRESENTADA A LA FACULTAD DE INGENIERÍA DE MINAS
PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO DE PETRÓLEO**

Br. PABLO MANUEL VILCHEZ CASTILLO
EJECUTOR

ING. CARLOS RAMÍREZ CASTAÑEDA
ASESOR

UNIVERSIDAD NACIONAL DE PIURA
Facultad de Ingeniería de Minas
Escuela Profesional de Ingeniería de Petróleo



TESIS

**“EFICIENTE REMOCIÓN DE LODOS PARA ASEGURAR UN EXITOSO
TRABAJO DE CEMENTACIÓN EN CAMPOS MARGINALES”**

**PRESENTADA A LA FACULTAD DE INGENIERÍA DE MINAS
PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO DE PETRÓLEO**



DR. ING. JUAN CARLOS TANTARUNA OCSAS
PRESIDENTE



ING. PEDRO TIMANÁ JARAMILLO M.Sc.
SECRETARIO



ING. JUAN C. ALIAGA RODRÍGUEZ M.Sc.
VOCAL



UNIVERSIDAD NACIONAL DE PIURA

FACULTAD DE INGENIERIA DE MINAS

DECANATO

"AÑO DE LA LUCHA CONTRA LA CORRUPCIÓN Y LA IMPUNIDAD"

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS

Los Miembros del Jurado Calificador nombrados mediante Resolución N° 398-CF-2019, de fecha siete de mayo de dos mil diecinueve, que suscriben, reunidos el día viernes doce de julio de dos mil diecinueve, a horas 1:00 p.m., en la Sala de Conferencias - FIM, para la sustentación de la Tesis titulada "**EFICIENTE REMOCIÓN DE LODOS PARA ASEGURAR UN EXITOSO TRABAJO DE CEMENTACIÓN EN CAMPOS MARGINALES**", conducida por el señor Bachiller en Ingeniería de Petróleo **VILCHEZ CASTILLO PABLO MANUEL**, la misma que cuenta con el asesoramiento del Ing° **Carlos Ramírez Castañeda**. Efectuadas las observaciones y dadas las respuestas, lo declaran:

DESAPROBADO	A P R O B A D O			
	Bueno	Muy Bueno	Sobresaliente	Excelente
	-----	-----	-----	-----

En consecuencia, queda en condición de ser calificado **APTO** y solicitar al Consejo Universitario de la Universidad Nacional de Piura, le otorgue el **TITULO PROFESIONAL DE INGENIERO DE PETRÓLEO**, de conformidad con lo estipulado en las normas legales vigentes de la Universidad Nacional de Piura.

Piura, 12 de julio de 2019.

DR. ING° JUAN C. TANTARUNA OCSAS
Presidente del jurado calificador

ING° PEDRO TIMANÁ JARAMILLO M.Sc.
Secretario del jurado calificador

ING° JUAN C. ALIAGA RODRÍGUEZ M.Sc.
Vocal del Jurado Calificador.

YMN.

DEDICATORIA.

Doy gracias a Dios por haber logrado realizar satisfactoriamente este proyecto de titulación.

Dedico este proyecto en memoria de mi madre Irma Oney Castillo Sánchez, mi querida hermana Rosa Irma del Pilar Vilchez Castillo y mi sobrina Cristina Ruíz Vilchez, que estuvieron al pendiente de mi educación ya que desde un inicio estuvieron presentes en cada momento de mi vida, para inculcarme valores y principios además de su muestra de cariño, orientándome por el buen camino y demostrándome que la vida no es nada fácil, enseñándome que todo tiene su sacrificio para seguir nuestros sueños.

AGRADECIMIENTO

Doy gracias a Dios por la oportunidad de haber estudiado, aprendido y formado en esta prestigiosa Universidad Nacional de Piura por haberme llevado correctamente en mi crecimiento como profesional, así como a mis profesores y personal administrativo de la escuela profesional de Ingeniería de Petróleo.

A mis asesores el Ingeniero Carlos Ramírez Castañeda y el Ingeniero Jiménez Nieves Edgar Teodoro por su tiempo, y por brindarme sus conocimientos siendo especialistas en el tema.

A mi jurado de tesis: Dr. Ing. Juan Carlos Tantaruna Ocsas (Presidente), Ing. Pedro B. Timana Jaramillo (Secretario) y el Ing. Juan Carlos Aliaga Rodríguez (Vocal) por sus observaciones correspondientes.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO I: ASPECTOS DE LA PROBLEMÁTICA	2
1.1. DESCRIPCIÓN DE LA REALIDAD PROBLEMÁTICA	2
1.2. JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA DE LA INVESTIGACIÓN	2
1.2.1. Definición del Problema	2
1.2.2. Delimitaciones: Espacial, Temporal	2
1.3. FORMULACIÓN Y PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN ...	2
1.3.1. Problema General	2
1.3.2. Problemas Específicos	2
1.4. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN	3
1.4.1. Objetivo General.....	3
1.4.2. Objetivos Específicos	3
1.5. DELIMITACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN	3
 CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO	4
2.1. ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN	4
2.2 BASES TEÓRICAS	4
2.2.1 Configuración de pozo.....	4
2.2.2 Lodos de Perforación.....	4
2.2.3 Cementación de Pozos	11
2.2.4 Remoción de lodos	20
2.2.4.1 Movimiento del Casing.....	20
2.2.4.2 Centralización del casing	21
2.2.4.3 Dispositivos Mecánicos: Tapones.....	24
2.2.4.4 Selección de Régimen de Flujo.....	24
2.2.5 Sistema de Pre Flujos.....	27
2.2.6 Registro de Calidad de Cemento – VDL – CBL	29
2.3 GLOSARIOS Y TÉRMINOS BÁSICOS.....	35
2.4 MARCO REFERENCIAL	37
2.5 ELABORACIÓN DE HIPÓTESIS	37
 CAPÍTULO III: MARCO METODOLÓGICO	38
3.1 TIPOS, NIVEL, MÉTODO Y DISEÑO DE INVESTIGACIÓN	38
3.2 SUJETOS DE LA INVESTIGACIÓN	38
3.3. MÉTODOS Y PROCEDIMIENTOS	38

3.4 TÉCNICAS E INSTRUMENTOS	39
3.5 ASPECTOS ÉTICOS	39
CAPÍTULO IV: RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	40
4.1 RESULTADOS.....	40
4.1.1 Medición de pH y Ensayo de Compatibilidad: Espaciador Mecánico y Lodo de Perforación.....	41
4.1.2 Medición de pH y Ensayo de Compatibilidad: Lavador Químico y Lodo de Perforación.....	41
4.1.3 Mejora Continua: compatibilidad entre espaciador mecánico (em modificado) y lodo de perforación.....	42
4.1.4.- Ensayo de Remoción.....	43
4.1.5.- Resultados de registro de CBL, VDL.....	43
4.1.6.- Evidencias de campo.....	44
4.2 DISCUSIÓN	46
CONCLUSIONES.....	47
RECOMENDACIONES.....	48
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	49
ANEXOS.....	51

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Objetivos de la Cementación.....	12
Figura 2.2 (a) Movimiento de Rotación y b) Movimiento de Reciprocación.....	21
Figura 2.3 El cemento tiende a fluir por el lado ancho del espacio anular.....	21
Figura 2.4 Centralizador del Casing, cortesía de Schlumberger, 2014	22
Figura 2.5 Tipos de Centralizadores, cortesía de Schlumberger, 2014	23
Figura 2.6 Tipos de tapones, cortesía de Schlumberger, 2014.....	24
Figura 2.7 Modelo Reológico, Plástico de Bingham	25
Figura 2.8 Modelo Reológico, Exponencial o Ley de Potencia	26
Figura 2.9 Ondas de medición acústica	30
Figura 2.10 Transmisión de la onda acústica.....	31
Figura 2.11 Arribo de Ondas acústicas	32
Figura 2.12. Arribos de Amplitud	32
Figura 2.13 Interpretación de señales de amplitud	33
Figura 2.14 Respuesta de Tiempo de Tránsito	33
Figura 2.15 Traducción del perfil de señal acústica a partir del perfil de densidad variable.....	34
Figura 2.16 Ejemplo de Cañería Libre	34
Figura 2.17 Ejemplo de Cañería con buena adherencia a casing y mala a formación.....	35
Figura 4.1 Configuración del Pozo en estudio.....	40
Figura 4.2 Floculación de EMO + (1 - 2.5) % PAS y Lodo de perforación.....	41
Figura 4.3 Ensayo de Compatibilidad de Lavador químico y Lodo de perforación.....	42
Figura 4.4 Ensayo de Compatibilidad de Espaciador mecánico (EM) modificado - NaOH y Lodo de perforación	42
Figura 4.5 Registro CBL - VDL (Pozo ALFA)	43
Figura 4.6 Registro CBL VDL (Pozo BETA)	44
Figura 4.7 Floculación de Preflujos con Lodo de perforación en zarandas (Pozo ALFA)	44
Figura 4.8 Retorno en perfil plano de preflujos Óptimo en zarandas (Pozo BETA).....	45
Figura 4.9 Muestra en superficie – Efecto de Floculación (Pozo ALFA)	45
Figura 4.10 Muestra en Superficie - Fluidez (Pozo BETA).....	46

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1. Clasificación API de cementos	13
Tabla 2.2 Requerimiento de agua en los tipo de cemento API	19
Tabla 2.3 Características de Movimiento del Casing	21
Tabla 2.4 Características de los tipos de flujo	25
Tabla 2.5 Perdida de Circulación	27
Tabla 2.6 Interpretación Cualitativa.	35
Tabla 4.1 Compatibilidad de EMO/LODO y pH.....	41
Tabla 4.2 pH del Lavador Químico	41
Tabla 4.3 Compatibilidad de Lavador Químico/LODO y pH.....	41
Tabla 4.4 Compatibilidad de EM Modificado - NAOH /LODO y pH.....	42

UNIVERSIDAD NACIONAL DE PIURA
FACULTAD DE INGENIERÍA DE MINAS
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA DE PETRÓLEO

BACH. PABLO MANUEL VÍLCHEZ CASTILLO

**“EFICIENTE REMOCIÓN DE LODOS PARA ASEGURAR UN EXITOSO TRABAJO DE
CEMENTACIÓN EN CAMPOS MARGINALES”**

RESUMEN

El objetivo de una eficiente remoción de fluidos previo a una cementación primaria genera un sello hidráulico entre el cemento y las formaciones expuestas durante la perforación, a fin de eliminar posibles flujos cruzados entre formaciones o flujo de fluidos hacia superficie a través del espacio anular, Además de proteger zonas debajo gradiente de fractura, proteger al casing del ataque de fluidos de formación, etc.

La propuesta de investigación reúne pozos situados en la Cuenca Talara cuyo estudio técnico – operacional se ajusta a condiciones reales, poniendo énfasis en los principales factores que afectan el diseño de la formulación de pre flujos, espaciadores y lechadas de cemento para generar una eficiente remoción y acondicionamiento óptimo previo a las operaciones de cementación.

Los factores a intervenir en nuestro estudio son: *Gradiente de temperatura, topes de formaciones productoras, gradiente de fractura y poral, densidades equivalentes (ECD mínimo y máximo), propiedades reológicas de fluido de perforación y otros fluidos, desviaciones de pozo, compatibilidad de los fluidos.*

Asimismo, nuestro estudio busca implementar un modelo de pre flujos alternados de baja a mediada viscosidad con régimen de flujo variado (Turbulento a laminar), que permita combinar distintos mecanismos de remoción de lodo, lodo inmóvil y costra de lodo.

PALABRAS CLAVE: Fluidos, Cementación, Casing, Gradiente de Temperatura, Propiedades Reológicas.

**NATIONAL UNIVERSITY OF PIURA
FACULTY OF MINING ENGINEERING
PROFESSIONAL SCHOOL OF OIL ENGINEERING**

BACH PABLO MANUEL VÍLCHEZ CASTILLO

**“EFFICIENT REMOVAL OF MUDS TO ENSURE A SUCCESSFUL CEMENTATION
WORK IN MARGINAL FIELDS”**

ABSTRACT

The objective of an efficient fluid removal prior to a primary cementing generates a hydraulic seal between the cement in the annular and the formations exposed during the drilling, in order to eliminate possible cross flows between formation or flux of fluids toward the surface through the annular space to protect areas below fracture gradient.

The research includes wells located in the Talara Basin, whose technical and operations study is adjusted to real conditions, emphasizing the main factors that affect the design of the formulation of pre flows, spacer and cement slurries to generate an efficient removal and Optimal condition prior to cementing operations.

The factor to interview in our study are temperature gradient, yield formation spot, fracture and pore gradient, equivalent densities(minimum and maximum ECD), rheological properties of drilling fluid and other fluids, well deviations, compatibility of the fluids.

Likewise, our study seeks to implement a model of alternating pre flows from low to medium viscosity with a varied flow regime (turbulent to laminar flow), which allows to combine different mechanisms of mud removal immobile mud.

KEY WORDS: Fluids, Cementation, Casing, Temperature Gradient, Rheological Properties.

INTRODUCCIÓN

El presente trabajo de investigación de Tesis se basa en el conocimiento litológico que comprende las diversas formaciones que se encuentran depositadas en la Cuenca talará, donde predominan multicapas de lutitas pardas con arenisca de grano fino y grueso por lo que el riesgo de hidratación estará presente durante todo el proceso de cementación de los pozos petroleros.

Durante las operaciones de perforación, el lodo puede sufrir contaminaciones con fluidos provenientes de la formación de pre flujos de los trabajos de cementación lo que modifica sus características reológicas principales.

El tipo de investigación es netamente ingenieril y operativa, toda vez que intenta conocer la evolución de las distintas soluciones que permitan mejorar la cementación del pozo.

Si hablamos de una contaminación de fluidez centralizaremos nuestra atención en saber cual es el efecto que surge, luego del contacto directo entre los preflujos y el lodo de perforación; una manera de medirlos cualitativamente y cuantitativamente es mediante el parámetro del pH de ambos sistemas de fluidos.

De esta manera dentro de la formulación del sistema de cementación de pozos el sistema de lodos de perforación muestra múltiples aplicaciones y permite mitigar posibles eventos que pudiesen ocurrir durante la cementación de pozos.

CAPÍTULO I

ASPECTOS DE LA PROBLEMÁTICA

1.1. DESCRIPCIÓN DE LA REALIDAD PROBLEMÁTICA

La mezcla o contaminación de los fluidos de perforación y fluidos de cementación (Lavadores y espaciadores) en el espacio anular del pozo durante el emplazamiento del cemento, causa alteración en la construcción del pozo e integridad del casing comprometiendo así el aislamiento zonal de la vida productiva total del pozo.

Esto puede resultar perjudicial en numerosos fenómenos adversos tales como la producción de fluidos no deseados, fallas en los trabajos de completación, influjos y migración no deseados de fluidos (Agua de formación), etc.

1.2. JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA DE LA INVESTIGACIÓN

1.2.1. Definición del Problema

Del planteamiento anterior, el término “Mezcla o contaminación de los fluidos”, trae consigo, el conocer los cambios físico - químico que ocurren entre ambos fluidos (Lodo de perforación y fluidos de cementación) fenómeno tales como la **Floculación** que genera una estructura frágil producto de atracción de partículas sólidas (entre ellas arcillas dispersas), son muy comunes en este tipo de trabajos.

1.2.2. Delimitaciones: Espacial, Temporal.

El problema requiere ser puntualizado en aquellos aspectos **concretos** que ofrezcan mayor utilidad y aporte al esfuerzo de optimizar los trabajos de cementación

Espacial. Como primera medida es dar a conocer que el estudio se realizará en los yacimientos de Nor Oeste Peruano, situado en la Ciudad del Alto, Provincia de Talara, departamento de Piura, en él se tiene campos de alto grado de explotación y una intensiva actividad de perforación.

Temporalmente, Debido a que el estudio del proyecto comprende, la interacción del análisis ingenieril, técnico y operativo, así como también la discusión y/o opinión de profesionales expertos, se estima una duración 04 meses calendarios e iniciando desde 02 de Agosto del presente año.

1.3. FORMULACIÓN Y PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

Terminada la fase Conceptual del problema se pasa a la de Indagación y Conjetura por medio de preguntas concretas, puntuales y precisas

1.3.1. Problema General

¿Cómo reducir los cambios Físico – Químicos que presenta la incompatibilidad de los fluidos de perforación con los fluidos que intervienen en los trabajos de cementación?

1.3.2. Problemas Específicos

- ¿Conocer los principios y efectos que generan estos cambios Físico – Químicos en ambos fluidos (Lodo de perforación y fluidos de cementación)?

- ¿Cuál de los parámetros a estudiar inciden en la incompatibilidad de fluidos?

1.4. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

1.4.1. Objetivo General

- **Optimizar** la remoción de lodos para asegurar el éxito de las operaciones de cementación.

1.4.2. Objetivos Específicos

- **Evaluar** los parámetros operacionales y requerimientos de pozo para un trabajo eficiente.
- **Determinar** los factores que contribuyen en los trabajos de cementación, principalmente incidir en el comportamiento reológico y compatibilidad de los fluidos.
- **Formular y evaluar** propuesta de cementación respecto a los sistemas de pre flujos en pozos de petróleo y /o Gas.

1.5. DELIMITACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

Se juzga que este estudio tiene relevancia para el progreso de las técnicas y uso de la tecnología en las zonas de estudio en cuestión por las siguientes razones:

Se justifica, que el mejoramiento de la integridad del pozo en el largo plazo constituye una prioridad creciente. Las compañías involucradas reconocen que un excelente aislamiento zonal requiere un óptimo sistema de remoción de lodo y un diseño adecuado del procedimiento de cementación.

Por tal, el presente trabajo tiene como propósito principal crear una propuesta técnica de cementación para la construcción de pozo en campos marginales.

Es importante, porque un deficiente aislamiento puede generar fenómenos adversos tales como producción de fluidos no deseados, pérdida de hidrocarburos hacia zonas de baja presión, existencia de presión detrás del casing, o corrosión, además del estado general y de la calidad de pozo. La solución de estos problemas demanda gastos adicionales y generalmente inesperados.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN

Conviene examinar con objetividad, la importancia de los lodos de perforación y sus funciones en el acondicionamiento del pozo previo a los trabajos de cementación, así como las mejores prácticas operacionales y técnicas dirigidas al proceso de cementación.

Esto permitirá una excelente base y soporte de las fuerzas axiales ejercidas por las columnas de fluido y el peso del casing, a su vez proporcionará un aislamiento zonal entre la formación y el casing, no solo al momento de la perforación y producción sino más allá del fin de la vida productiva de pozo.

2.2 BASES TEÓRICAS

2.2.1 Configuración de pozo.

Hoy en día los campos marginales, se caracteriza por perforar pozos infill, es decir con menor espaciamiento inter pozo (offset), debido a la compleja heterogeneidad geológica y compartimentalización de los formaciones objetivos.

Asimismo, al tener zonas con alta producción, genera riesgo de pérdida de circulación en zonas vecinas y posible segregación de gas por depletación de los mismos campos.

Estas y otras condiciones, conlleva a tener cuidado en la configuración del equipo y pozo, donde predomina lo siguiente:

- Equipos Hidráulico, modular de alto grado de automatización con reducción de riesgo de accidentes y menor impacto ambiental.
- Facilidad y rapidez en los DTM.
- Pozos verticales
- Profundidad promedio a 4500 ft.
- Perforación en dos fases: Fase de Superficie 12 1/4" y Fase de Producción 8 1/2".
- Registros direccionales: LWD, MWD.
- Tiempos de perforación: 4 días aproximadamente.

2.2.2 Lodos de Perforación.

El fluido utilizado durante las labores de perforación de un pozo es llamado también lodo de perforación; siendo éste, el componente más importante que existe durante este proceso. El lodo es un fluido preparado con materiales químicos, en circulando en circuito dentro del hoyo por el interior de la tubería, impulsado por bombas y finalmente, devuelto a la superficie por el espacio anular (espacio formado entre la pared del hoyo y el diámetro exterior de la tubería). Las principales funciones que ejerce el lodo durante la perforación en cualquiera de sus variantes (gas, aire, agua, diésel y suspensión coloidal a base de agua y arcilla), son las siguientes:

- a) **Enfriamiento y lubricación de la barrena.** Durante la perforación se va produciendo un calor considerable debido a la fricción de la barrena y herramienta con la formación que tiene una temperatura natural llamada "Gradiente Geotérmico (Relación que existe entre la temperatura y la profundidad del pozo; donde dicho gradiente promedio es de 1° Centígrado por cada 30 metros (100 pies) de profundidad.". Debido a esto, el lodo debe tener suficiente capacidad calorífica y conductividad térmica para permitir que el calor sea recogido desde el fondo del pozo para ser transportado a la superficie y

dispersado a la atmósfera; el lodo también ayuda a la lubricación de la barrena mediante el uso de emulsionantes o aditivos especiales que afecten la tensión superficial. Esta capacidad lubricante se demuestra en la disminución de la torsión de la sarta, aumento de la vida útil de la barrena, reducción de la presión de la bomba, etc.

- b) **Estabilidad en las paredes del hoyo.** Esto se refiere a la propiedad que tiene el lodo para formar un enjarre o película que se forman en las paredes del hoyo que sea liso, delgado, flexible y de baja permeabilidad; lo cual ayuda a minimizar los problemas de derrumbes y atascamiento de la tubería, además de consolidar a la formación. Así mismo, este proceso evita las filtraciones del agua contenida en el lodo hacia las formaciones permeables y reduce la entrada de los fluidos contenidos en la formación al ejercer una presión sobre las paredes del hoyo P.H (Presión hidrostática). Normalmente, la densidad del agua más la densidad de los sólidos obtenidos durante la perforación es suficiente para balancear la presión de la formación en las zonas superficiales. De baja presión.
- c) **Barrena que levante y acarree simultáneamente los recortes perforados (V.A velocidad anular).** La eficiencia del acarreo de la muestra del fondo del pozo a la superficie depende de la velocidad del lodo en el espacio anular que está en función del gasto de la bomba de lodo, el diámetro del hoyo, la velocidad de bombeo y el diámetro exterior de la tubería de perforación.
- d) **Control de las presiones de la formación.** Otra propiedad del lodo es la de controlar las presiones de la formación, siendo ésta con un rango normal de 0.107 kg/cm^2 por metro. A esto se le denomina “Gradiente de Presión de Formación”; el lodo genera una presión (Presión Hidrostática) que contrarresta la presión de la formación. La presión hidrostática está en función de la densidad del lodo y de la profundidad del hoyo. La densidad del fluido de perforación debe ser adecuada para contener cualquier presión de la formación y evitar el flujo de los fluidos de la formación hacia el pozo.
- e) **Soporte sustantivo del peso de la sarta de perforación.** Con el incremento de las profundidades perforadas, el peso que soporta el equipo de perforación se hace cada vez mayor, y con base en el *Principio de Arquímedes* la tubería recibe un empuje ascendente al estar sumergida en el fluido de perforación. A este fenómeno también se le conoce como efecto de flotación donde el empuje depende de la profundidad a la que se encuentra la tubería y la densidad del fluido sustentante. El peso de la sarta de perforación y el de la tubería de revestimiento en el lodo, es igual a su peso en el aire multiplicado por dicho factor de flotación. El aumento de la densidad del lodo conduce a una reducción del peso total que el equipo de superficie debe soportar.
- f) **Suspensión de cortes y sólidos al interrumpirse la perforación.** Cuando la circulación se interrumpe por un tiempo determinado, los recortes quedan suspendidos debido a una característica del lodo llamada “gelatinosidad” la cual evita que los cortes caigan al fondo y causen problemas al meter la tubería y al reanudar la perforación.
- g) **Transmisión de la potencia hidráulica a la barrena.** - El fluido de perforación es el medio para transmitir la potencia hidráulica requerida a través de las salidas del lodo en la barrena (toberas), donde gran parte de esta potencia producida por las bombas se

utiliza para mover la columna del lodo existente en el espacio anular.

- h) **Circulación pertinente;** ayudando a perforar la formación y limpiar el fondo del hoyo. Las propiedades químicas del flujo del lodo (viscosidad plástica, punto cedente, etc.), ejercen una considerable influencia sobre las propiedades hidráulicas y deben ser controladas con los valores apropiados.
- i) El contenido de sólidos en el lodo también debe ser controlado en un nivel óptimo para lograr los mejores rendimientos.

Existen muchos tipos de lodos de perforación, tanto de base agua como de base aceite (diésel): niebla, espuma, aireado, bentónico, fosfático, cálcico, polimérico, salados, lodos CLS, CLS emulsionados y lodos de emulsión inversa. (Los fluidos se programan de acuerdo a las características de las rocas a perforar).

Lodos Base Agua:

El lodo bentónico o lodo de perforación es una mezcla de agua con bentonita, un tipo de arcilla muy densa. Es utilizado para perforar pozos de sondeo y muy frecuentemente, mientras se perforan pozos de petróleo y gas natural. Además, se usa para trabajos más sencillos como los pozos de agua.

Una propiedad muy importante de este tipo de lodos es que están constituidos por bentonita, que es una arcilla que no pierde consistencia ni estabilidad aunque se le añada una gran cantidad de agua. Esto permite que el lodo pierda resistencia al ser amasado sin que el agua varíe y se comporte como fluido. Si se deja en reposo, vuelve a adquirir resistencia. También puede tener otros aditivos como el sulfato de bario, el carbonato de calcio o la hematita. Además, se usan adelgazadores para influir en la viscosidad del fluido como goma xantana, goma guar, diol, almidón y otros.

Los lodos de perforación tienen una serie de propiedades que deben controlarse para su buen funcionamiento. Una de ellas es la **viscosidad**, que es la resistencia del fluido. De ella depende que el material de perforación tenga una buena limpieza, además de permitir que el detritus esté suspendido y sea extraído. **La densidad** es otra propiedad importante que permite que el lodo ejerza la contrapresión necesaria en las paredes de la excavación o perforación. **La tixotropía** es la capacidad del lodo bentónico de cambiar de estado consistente a uno líquido al estar en movimiento y volver a ser consistente al estar en reposo. También debe estar libre de arena para ser de calidad. Sin embargo, al momento de perforar, las partículas arenosas se van mezclando y afectan a la viscosidad y tixotropía y, por lo tanto, su calidad. Otro factor que debe ser revisado constantemente es el pH, que debe ser equilibrado para que el lodo sea estable y se evite la sedimentación. El lodo bentónico incluye la extracción del ripio de perforación o detritus, la refrigeración de las brocas, la estabilización de la columna de perforación y su lubricación para el roce con el terreno, el control de la presión que se ejerce, la estabilización constante del pozo, minimización de los daños, el control de corrosión, entre otros.

Cuando se le agrega al agua a los productos químicos orgánicos se les denomina lodos base agua con dispersantes orgánicos, y cuando se les agrega aceite se denominan emulsionados.

Los primeros son los más utilizados y se clasifican de acuerdo al dispersante usado en su control. Los lodos base agua emulsionados requieren en su preparación aceite, diésel o crudo en cantidad de 5 a 10% del volumen total del lodo. Las ventajas de este tipo de lodo son:

- Aumentar el avance de la perforación.
- Prolongar la vida de la barrena.
- Reducir la torsión y embolamiento de la barrena.
- Prevenir pegaduras por presión diferencial.
- Mejorar el enjarre.
- Incrementar la lubricidad de la barrena.

Sin embargo los lodos base agua pueden provocar no sólo disminución de la densidad y el filtrado sino aumento de la viscosidad.

Lodos Inhibidos.

En algunas operaciones de perforación, los lodos base agua no resultan efectivos, sobre todo cuando se requieren altas densidades sin alterar la viscosidad o gelatinosidad. En estos casos, se recomienda el uso de los lodos inhibidos tales como los cálcicos, base yeso, de agua de mar y de agua saturada de sal. Dentro de las ventajas de los lodos inhibidos tanto cálcicos como base yeso se pueden mencionar la protección que estos brindan a la tubería de perforación de la corrosión y suspensión de la actividad biológica; sin embargo, tienen la desventaja de solidificarse a temperaturas de fondo mayores de 120° C. Por otra parte, los lodos de agua de mar y de agua saturada de sal se usan generalmente para evitar los problemas de perforación provocados por la presencia de sal en la columna litológica.

Lodos de Bajo Contenido de Sólidos.

Se define como un lodo de perforación, terminación o reparación al que cumple ciertos requisitos de densidad, viscosidad y control de filtración con un contenido mínimo de arcilla. Dentro de este tipo de lodos se pueden nombrar los siguientes: gomas, asbestos finamente divididos, arcilla beneficiada, combinados (bentonita prehidratada-lignosulfonato) y lodo no dispersivo. En áreas donde este tipo de lodos es aplicable, se obtienen grandes ahorros por:

- Aumentar el grado de penetración.
- Incrementar la vida de la barrena.
- Mejorar la estabilidad el hoyo.

Por otra parte, el uso de este tipo de lodos es delicado (por la estabilidad del pozo), por lo que deben tomarse ciertas consideraciones en su uso tales como: reducción del uso de bentonita para controlar la viscosidad y el filtrado, control del filtrado con polímeros orgánicos, y el uso de doble malla en las temblorinas para una mejor eliminación del recorte y del funcionamiento óptimo del eliminador de sólidos.

Lodos Base Aceite (Emulsión Inversa).

El lodo base aceite se refiere a lodos preparados en aceite con un porcentaje de 1 a 5% de volumen de agua, mientras que el lodo de emulsión inversa se usa para designar un lodo con más del 5% y hasta con 40% de volumen de agua; éste se puede dispersar y emulsificar con aceite. Estos fluidos son estables a altas temperaturas, inertes a la contaminación

química y pueden ser densificados después de ser ajustada la relación aceite-agua. Estos tipos de lodo se utilizan en los siguientes casos:

- Formaciones con altas temperaturas
- Formaciones con lutitas hidrófilas (arcillas deshidratadas)
- Formaciones con anhidrita o yeso
- Formaciones salinas
- Formaciones con intercalaciones de asfalto
- Formaciones solubles
- Protección de arenas productoras
- Baches para liberar tuberías pegadas por presión diferencial
- Zonas de alta presión

El uso de este tipo de lodos puede ocasionar, para los estudios en pozos exploratorios, algunos de los siguientes inconvenientes:

- Alteración en los valores de la cromatografía de los gases e hidrocarburos en las zonas de interés.
- Imposibilidad de efectuar algunos tipos de registros geofísicos (resistividad, potencial natural, echados, etc.); por la base aceite del lodo que afecta a la fuente de energía eléctrica de los registros.
- Alteración de los análisis geoquímicos por la base aceite.
- Apreciación de la fluorescencia en las muestras de canal y de núcleos

Las principales características reológicas de un lodo de perforación son: densidad, viscosidad, viscosidad plástica, viscosidad aparente, gelatinización, punto cedente, filtrado, enjarre, pH y cloruros.

Densidad: Se define como la relación de masa dividida por unidad de volumen. Su función es el mantener a los fluidos contenidos dentro del hoyo en el yacimiento durante la perforación, manteniendo de este modo la presión requerida que ejercen las paredes del hoyo.

Las unidades comunes de densidad son las libras por galón (lb/gal), libras por pie cúbico (lb/ft³), kilogramos por centímetro cúbico (kg/cm³) y gramos por centímetro cúbico (gr/cm³); siendo esta última la más utilizada en el campo.

La densidad máxima del lodo que se requiere en la perforación de un pozo, está determinada por el gradiente de presión., la presión de poro a una profundidad dada excede la presión ejercida por el peso de la formación sobre la profundidad evaluada (presión de sobrecarga).

Para prevenir la entrada de fluidos desde la formación al hoyo, el lodo debe proveer una presión mayor a la presión de poros encontrada en los estratos a ser perforados. Un exceso en la densidad del fluido puede ocasionar la fractura de la formación con la consiguiente pérdida de fluido de control.

Viscosidad: Es una medida de resistencia interna que presenta un fluido al desplazarse en función directa a la presión y temperatura del yacimiento. Los lodos de perforación tienen características de flujos no lineales (tixotrópicos) y requieren de más de un término de

viscosidad para definir su comportamiento viscoso.

La viscosidad se expresa en medidas relativas (Viscosidad aparente o de embudo), o en medidas absolutas (viscosidad plástica, punto cedente y gelatinosidad). Para un fluido de perforación, las propiedades deseadas de viscosidad efectiva proporcionan a la barrena una óptima potencia hidráulica, manteniendo el hoyo limpio en el espacio anular.

Así mismo, se requiere de una baja viscosidad efectiva para que el lodo desprenda los cortes al llegar a la superficie también debe tener suficiente gelatinosidad para mantener a los cortes sólidos en suspensión cuando el fluido no esté en movimiento.

La medida de viscosidad utilizada es con el embudo (viscosímetro Marsh) que se determina en segundos y en un rango normal puede ser de **45 a 75 segundos para los lodos base agua** y de hasta **160 segundos para lodos de emulsión inversa**.

Esta viscosidad aumenta a medida que los contaminantes son introducidos y/o que el contenido de sólidos se incrementa, por lo que la viscosidad aparente también aumenta. Por el contrario, la viscosidad suele decrecer al aumentar la temperatura y por lo tanto la viscosidad aparente también disminuye.

Viscosidad Plástica: Es la parte de la resistencia del fluido en movimiento causada por fricción mecánica. Esta fricción se produce entre los sólidos contenidos en el lodo y el líquido que lo rodea y por el esfuerzo cortante del propio líquido. En general, al incrementar el porcentaje de sólidos en el sistema, se aumenta la viscosidad plástica. El control en lodos de bajo y alto peso es indispensable para mejorar la reología y alcanzar promedios altos de penetración de la formación.

Viscosidad Aparente: Se define como la medición en centipoises (cps) que un fluido Newtoniano debe tener en un viscosímetro rotacional a una velocidad de corte previamente establecida, con los efectos simultáneos de todas las propiedades de flujo.

Gelatinización: Es una medida del esfuerzo de ruptura o resistencia de la consistencia del gel formado que muestra la fuerza de la floculación del lodo bajo condiciones estáticas. La tasa de gelatinización se refiere al tiempo requerido para formarse el gel. Si la gelatinización se forma lentamente después de que el lodo está en reposo, se dice que ésta es baja, siendo alta en caso contrario. Un lodo que presenta esta propiedad se le denomina tixotrópico y su grado se determina midiendo la fuerza de gel. El conocimiento de esta propiedad es importante para prever dificultades durante la circulación del fluido cuya resistencia a la gelatinización debe ser suficientemente baja para:

- Permitir que la arena y el recorte sean depositados en el tanque de decantación.
- Conservar el buen funcionamiento de las bombas y una adecuada velocidad de circulación.
- Minimizar el efecto de succión cuando se saca la tubería, y el efecto de pistón cuando se introduce la misma en el hoyo.
- Lograr la separación del gas incorporado en el lodo.
- Mantener la suspensión de los sólidos incorporados cuando se está añadiendo la barita y al estar el lodo estático.

Punto cedente: Es la resistencia que presenta el lodo a fluir a causa de las fuerzas electroquímicas de atracción entre las partículas sólidas. Estas fuerzas son el resultado de las cargas negativas y positivas localizadas cerca de la superficie de las partículas. Bajo condiciones de flujo, el punto cedente depende de las propiedades de los sólidos en el lodo en la superficie, de la concentración de los sólidos en el volumen del lodo y de la concentración y tipos de iones en la fase líquida del lodo. Cuando el punto cedente es alto, debido a los contaminantes solubles como el calcio, carbonatos y por los sólidos arcillosos de las formaciones, se provoca la floculación del lodo que debe controlarse con dispersantes. El punto cedente y los esfuerzos de gelatinización son considerados medidas de la hidratación y de la floculación de las arcillas.

Filtrado: También conocido como pérdida de agua, es la cantidad de agua proveniente del lodo que se filtra hacia la formación en las formaciones permeables, y que debe mantenerse lo más bajo posible para tener una buena estabilidad del hoyo y evitar daños a la formación. Básicamente hay dos tipos de filtración: estática y dinámica. La estática ocurre cuando el fluido no está en movimiento, mientras que la dinámica ocurre cuando el lodo fluye a lo largo de la superficie filtrante; Durante el proceso de filtración estática, el revoque (embarrado) aumenta de espesor con el tiempo mientras que la velocidad de filtración disminuye, por lo que el control de este tipo de filtración consiste en prevenir la formación de revoques muy gruesos. Por otro lado, la filtración dinámica se diferencia de la anterior debido a que el flujo de lodo a medida que pasa por la pared del pozo tiende a raspar el revoque a la vez que se va formando, hasta que el grosor se estabiliza con el tiempo y la velocidad de filtración se vuelve constante. El control de este tipo de filtración consiste en prevenir una pérdida excesiva de filtrado a la formación.

La temperatura, el tipo y tamaño de las partículas suspendidas en el lodo y la presión de formación, son algunos de los factores que afectan en la pérdida de agua del fluido de perforación, Teniendo una relación directa en el ritmo de penetración y en la concentración de gas en el lodo al momento de la perforación. La medida del filtrado se realiza mediante la prensa de filtrado a temperatura ambiente, colocando el lodo dentro de la prensa con una presión de 100 psi durante 30 minutos.

Revoque: Es una capa o película delgada de lodo que se forma en las paredes del hoyo. Se presenta principalmente en aquellas formaciones permeables; el espesor de la capa puede variar de **1 a 4 mm**. Cuando el enjarre no se forma, el lodo invade las formaciones permeables. Para la formación de enjarre, es esencialmente necesario que el lodo contenga algunas partículas de un tamaño muy pequeño para el cierre de los poros de la formación. Los enjarres pueden ser compresibles o incompresibles, dependiendo de la presión a la que sean sometidos. La formación del enjarre va a depender principalmente de la pérdida de agua y de la permeabilidad de la roca.

pH, (potencial Hidrógeno): Es el grado de acidez o de alcalinidad en el lodo. Se define como el logaritmo negativo de la concentración de iones o cationes de hidrógeno $[H^+]$, y es una medida que se usa para describir el carácter ácido (acidez) o básico (basicidad) relativo a una solución (lodo); donde los valores bajos de pH corresponden a una acidez creciente y los altos valores de pH a una alta basicidad. Un cambio de una unidad de pH corresponde a un aumento de diez veces la concentración de iones de hidrógeno.

Los valores del pH van de 1 a 14, cuya solución neutra es el agua destilada con un pH de 7. El valor propio del pH para un fluido de perforación depende de su tipo, pero normalmente deben de ser de 8.5 a 10.5 para obtener un pH estable y duradero; para esto se utiliza sosa cáustica o hidróxido del potasio. La medida del pH en el campo en general se determina colorimétricamente por medio del papel indicador de pH (tornasol) que muestra la variación del color al mojarlo con la solución. En el caso del lodo, se utiliza el líquido del filtrado resultado del mismo.

Los ácidos se pueden describir como sustancias que tienen un sabor agrio. Estos producen efervescencia al entrar en contacto con carbonatos, cambian a rojo el color azul del papel tornasol y reaccionan con bases, álcalis y ciertos metales para formar sales; todos los ácidos contienen hidrógeno. Los ácidos son calificados de fuertes o débiles según la concentración de iones hidrógeno (H^+) resultante de la ionización. Las bases pueden ser descritas como sustancias que tienen un sabor amargo, una textura resbaladiza en solución, la capacidad de cambiar a azul el papel de tornasol rojo, y la habilidad de reaccionar con ácidos para formar sales.

Las bases no producen ninguna efervescencia al entrar en contacto con carbonatos; los ácidos reaccionan con las bases para formar sales. Una base es calificada de fuerte o débil según la cantidad de la molécula que se disocia en iones hidroxilo (OH) en la solución.

Cloruros: los cloruros son compuestos que llevan un átomo de cloro en estado de oxidación formal -1, y se pueden obtener por la reacción de una base (óxido, hidróxido, carbonato, etc.), y del ácido clorhídrico. El cloruro más conocido es la sal marina que está presente en el agua de mar con una concentración del 3 - 3,5 % aproximadamente. La concentración de cloruros es de suma importancia en los lodos de perforación, ya que al incrementarse su salinidad, la solubilidad de las sales y aditivos generalmente aumenta provocando reacciones químicas tales como la precipitación.

2.2.3 Cementación de Pozos.

Cementar un pozo no es otra cosa que preparar una mezcla de agua y cemento en superficie, ya sea utilizando un camión cementador o un mezclador, bombearlo al pozo y ubicarlo en un determinado lugar. A la mezcla de agua y cemento se le denomina “**Lechada de Cemento**”. La lechada de cemento que es bombeada al pozo cumple varias funciones. Primeramente, es usado como un material sellante impermeable en la perforación de pozos de petróleo y gas. Pero es más comúnmente usado como un sello entre el casing y el hoyo, uniéndolo a la formación y proveyendo una barrera para el flujo de fluidos desde o dentro de la formación detrás del casing y desde y dentro de la sección del pozo subsecuente. Sin embargo, cuando la lechada es colocada entre la cañería y el hoyo puede desempeñar otras funciones.

Las operaciones de cementación se clasifican de acuerdo a los objetivos que se persiguen, en este sentido tenemos:

- Cementación Primaria.
- Cementación Forzada.
- Tapones de Cemento.

El trabajo se centrará en desarrollar trabajos de cementación primaria, el cual daremos mayores detalles.

Cementación Primaria.

Es el proceso que consiste en colocar cemento en el espacio anular, entre el casing y la formación expuesta del hoyo, asegurando un sello completo y permanente.

Objetivos de la Cementación Primaria.

- Proporcionar aislamiento entre zonas del pozo que contiene gas, petróleo y agua.
- Soportar el peso del casing.
- Reducir el proceso corrosivo del casing con los fluidos del pozo y con los fluidos inyectados de estimulación.
- Evitar derrumbes de la pared de las formaciones no consolidadas.

El reto principal es obtener sellos hidráulicos efectivos en las zonas que manejan fluidos a presión. Para lograrlo es indispensable mejorar el desplazamiento del lodo de perforación del tramo del espacio anular que se va a cementar consiguiendo así una buena adherencia sobre las caras de la formación y del casing, sin canalizaciones en la capa de cemento y con un llenado completo.

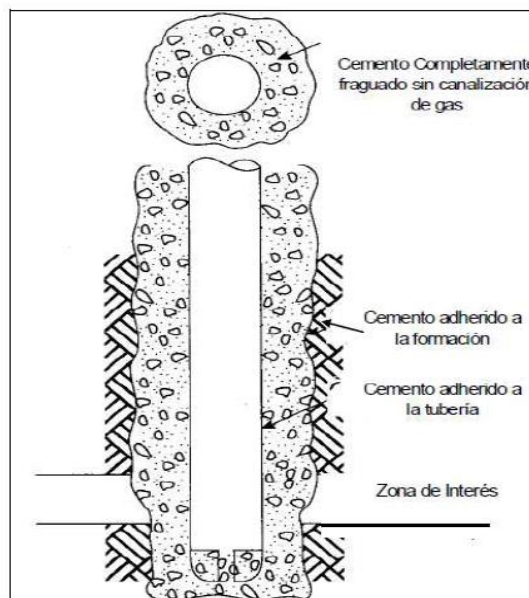


Figura 2.1. Objetivos de la Cementación.

¿Qué es el cemento?

Es una mezcla compleja entre el “Clinker”, el cual contiene todos los componentes del cemento y el “Yeso”, el cual se le agrega como ingrediente final. La relación entre ambos componentes principales es de aproximadamente 95/5%(p/p).

Los componentes que forman el cemento son óxidos superiores de oxidación lenta. Esto significa que termina su grado de oxidación al estar en contacto con el aire al enfriarse.

Cemento Portland. Es el más importante en cuanto a términos de calidad. Es el material idóneo para las operaciones de cementación de pozo. Algunos cementos Portland son de fabricación especial, debido a que las condiciones de los pozos difieren significativamente entre sí, al variar su profundidad.

El ejemplo típico de un cemento hidráulico: fragua y desarrolla resistencias a la compresión como resultado de la hidratación, la cual involucra reacciones químicas entre el agua y los componentes presentes en el cemento.

Fraguado desde el punto de vista Físico.

Desde el punto de vista físico se reconocen 03 fases o etapas.

- 1.- El “**Fragüe Inicial**”, que ocurre cuando la lechada pierde toda su plasticidad y se vuelve friable al grado tal que dos fragmentos se los pone en contacto íntimo, la plasticidad no se recupera, ni colocando nuevamente agua.
- 2.- Luego del fragüe inicial, el cemento sufre más cambios físicos debido a que continua la hidratación, estos cambios se traducen en que el cemento adquiere mayor dureza hasta alcanzar el “**Fragüe final**”. Arbitrariamente se lo define como la condición que alcanza cierto grado de rigidez determinado por una aguja de penetración, en general el fragüe final ocurre de 2 a 5 horas después del fraguado inicial.
- 3.- Luego del fraguado final con un periodo de 10 a 28 días por ajustes químicos que dan como resultado un aumento gradual de la resistencia y la dureza. Todo este periodo se conoce como “**Período de Endurecimiento**”, este periodo es muy importante en la industria petrolera, ya que durante este periodo en el pozo no se deben estar desarrollando actividades extras.

Indudablemente este periodo es demasiado largo para las operaciones en el pozo, por esta razón con la ayuda de aditivos químicos especiales se puede reducir el tiempo de espera hasta 6 o 8 horas.

Tipos de cemento.

La especificación API, define 09 diferentes clases de cemento (de A a H), dependiendo de la proporción de los cuatro componentes químicos fundamentales (C3, C2S, C3A, C4AF, siendo C: calcio, S: Silicato, A: Aluminato y F: Fluoruro).

Clases API	Agua de Mezcla gal / sx	Lechada wt. ppg	Profundidad en pies	BHST °F
A (Portland)	5.2	15.6	0-6000	80-170
B (Portland)	5.2	15.6	0-6000	80-170
C (Alta Temprana)	6.3	14.8	0-6000	80-170
D (Retardada)	4.3	16.4	6000-10000	170-230
E (Retardada)	4.3	16.4	6000-10000	170-230
F (Retardada)	4.3	16.4	10000-16000	230-320
G (California Básico)	5.0	15.8	0-8000	80-200
H ("Gulf Coast" Básico)	4.3	16.4	0-8000	80-200

Tabla 2.1. Clasificación API de cementos.

Dentro de los cementos especiales, se encuentra **Cemento Pozmix**, este tipo está formado de la mezcla de cemento Portland con Puzolana (tierra o cenizas Volcánicas) y 2% de bentonita. Este es un cemento bastante liviano pero muy durable.

Aditivos de cemento.

Dependiendo de cómo se seleccionen, los aditivos pueden afectar a las características de las lechadas de cemento en una variedad de formas, modificando los tiempos de bombeabilidad, densidad de lechada, controladores de filtrado, propiedades reológicas, provee resistencia (elasticidad) al cemento fraguado, controla la permeabilidad y provee al cemento características expansivas durante el fraguado, controla la liberación del calor de hidratación, etc.

Otros parámetros importantes incluyen la temperatura, presión, concentración de aditivos, energía de mezcla, orden de mezcla y relación de agua/cemento.

Debido a la complejidad de los mecanismos de hidratación del cemento, y al gran número de parámetros involucrados.

Los aditivos se clasifican en ocho categorías.

- 1.- Aceleradores.
- 2.- Retardadores.
- 3.- Extendedores.
- 4.- Agente densificantes.
- 5.- Dispersantes.
- 6.- Agentes para control de filtrado.

1.- Aceleradores.

Son adicionados a las lechadas de cemento para reducir el tiempo de bombeabilidad y acelerar el proceso de fragüe, especialmente en las lechadas a ser usadas en formaciones someras de bajas temperatura. Utilizando este tipo de aditivos, los cementos básicos pueden desarrollar una resistencia a la compresión de 500 psi en un menor período de tiempo. Este valor de resistencia es el que generalmente se acepta como el mínimo para la adherencia y soporte de la cañería.

Los **cloruros**, son los aditivos más utilizados, cuando el cemento comienza con la hidratación, se forma un hidrato de silicato gelatinoso alrededor de las partículas de cemento lo que restringe el porcentaje de agua. Los aceleradores ayudan a romper este saco gelatinoso, permitiendo una rápida penetración del agua. Sin embargo, este no es el único mecanismo operativo. **El catión Calcio del Cloruro de Calcio** permite la formación de hidrato de silicato de calcio, uno de los materiales ligantes primarios del cemento portland a baja temperatura, permitiendo el desarrollo más rápidamente de la resistencia a la compresión. Al aumentar el volumen de CaCl_2 aumenta el volumen y porcentaje de desarrollo de material ligante.

Cloruro de Calcio. Es un material higroscópico (absorbe la humedad del aire) y puede presentarse en polvo, escamas o perlas. Las concentraciones normalmente utilizadas son de 1 a 4% en peso con relación al cemento, dependiendo de la pureza del producto. Concentraciones excesivas aumenta la viscosidad de la lechada y se pierde el control sobre el tiempo de bombeabilidad, resultando un comportamiento impredecible de la lechada. Los beneficios de este aditivo produce básicamente disminuir tiempo de bombeabilidad, aumentar la resistencia inicial y reducir el WOC (waiting on cement).

2.- Retardadores. A medida que las temperaturas estáticas de fondo y las profundidades aumentan, resulta necesario aditivar las lechadas a los efectos de tener el tiempo de bombeabilidad suficiente como para colocar con seguridad el cemento en el anular.

Estos aditivos deben cumplir los siguientes requisitos:

- Deben extender el tiempo de bombeabilidad.
- Deben ser compatibles con el cemento y los otros aditivos incorporados en la lechada.
- Deben mantener la consistencia (Bc) constante a lo largo de su bombeabilidad.

El porcentaje de aditivo a usar en muchas oportunidades es crítico, por lo tanto una incorrecta dosificación en el campo puede producir un corto o excesivo retardo.

La mayoría de estos aditivos actúan por mecanismos combinados de adsorción, precipitación y complejo de productos de reacción sobre los granos del cemento, recubriendo la superficie de las partículas de cemento reduciendo la reacción de hidratación.

Retardadores Base Lignitos. Los más usados son las sales de sodio y calcio de los ácidos lignosulfónicos. Estos retardadores son polímeros derivados de la pulpa de la madera, por lo tanto, usualmente no se encuentran refinados y contienen cantidades variables de compuestos sacáridos. Su concentración va en el rango de 0.1 al 1.5 % BWOC y se puede utilizar con todas las clases de cemento API.

3.- Aditivos Extendedores o Alivianadores.

Presentan los siguientes propósitos, **Reducir la densidad de la lechada**, se puede reducir el peso de la lechada para disminuir así la presión hidrostática y prevenir la pérdida de circulación inducida. Además, el número de etapas requeridas para la cementación de un pozo puede ser minimizado.

Otro propósito, **Incrementa el rendimiento de la lechada**, reducen la cantidad de cemento requerido para producir un volumen dado de producto fraguado.

Silicato de Sodio. Los silicatos reaccionan con el calcio del cemento para formar un gel de silicato de calcio que provee suficiente viscosidad para permitir que se usen grandes cantidades de agua de mezcla sin excesiva agua libre. Su mayor ventaja de los silicatos es su eficiencia, lo cual facilita el almacenaje y manipuleo. Sin embargo, debido a su tendencia a acelerar, tienden a reducir la efectividad de otros aditivos.

Este aditivo se mezcla en seco con el cemento. Si se adiciona al agua de mezcla previa a la preparación de la lechada. Puede no formarse el gel a menos que se adicione cloruro de calcio. Los rangos de concentración recomendada de silicato de sodio van de 0.2% a 3% BWOC. Estas concentraciones proporcionan a la lechada de densidad que van desde 14.5 a 11 lb/gal.

Si a la lechada se le incluye cloruro de calcio, este debe adicionarse antes de agregar el silicato de sodio, para obtener suficientes propiedades expansivas.

4.- Densificantes.

Son utilizados para controlar formaciones sobre presurizadas, con gas o formaciones plásticas. Bajo estas condiciones resulta necesario utilizar lechadas de alta densidad y de esta manera no desbalancear la columna hidrostática que controla los fluidos de formación.

Un método para incrementar la densidad de la lechada es simplemente reducir la cantidad de agua de mezcla. En este caso es necesario agregar un dispersante para mantener la bombeabilidad. La principal desventaja de las lechadas con agua reducida es la dificultad de alcanzar simultáneamente un adecuado control de filtrado, aceptable reología y evitar la sedimentación de sólidos.

El agente densificante más comunes para las lechadas de cemento son la Baritina, que es un material blanco grisáceo en polvo, que requiere agregado de agua adicional con lo cual pierde eficiencia como densificante.

5.- Reductores de Filtrado.

Cuando una lechada de cemento es alojada a través de una formación permeable bajo presión, ocurre un proceso de pérdida de fluido o filtrado de fluido. La fase acuosa de la lechada escapa hacia la formación dejando las partículas de cemento detrás. Si este proceso no es controlado se producen serias consecuencias sobre el trabajo de cementación. A medida que el volumen de agua decrece, la densidad de lechada se incrementa y su comportamiento reológico, bombeabilidad y resistencia diferirán del diseño.

Si la pérdida es suficientemente grande, la lechada se torna no bombeable y puede producirse un fragüe espontáneo (flash).

El ensayo de filtrado API se realiza a través de una malla 325 registrando la pérdida de fluido en 30 min, con un diferencial de presión de 1000 psi (Norma API RP 10B Recommended Practice for Well Cementing Sección 10).

Un buen reductor debe cumplir las siguientes condiciones:

- Buen control de pérdida de fluido.
- Estabilidad con la temperatura.
- Tolerancia al pH.
- Compatibilidad con el resto de aditivos de cementación.
- No afectar las condiciones de fragüe de la lechada (Bombeabilidad, resistencia a la compresión).
- Control de Agua libre y de Sedimentos de Sólidos.

Polímeros solubles en agua.

Actúa simultáneamente incrementando la viscosidad de la fase acuosa y disminuyendo la permeabilidad del revoque de filtrado.

La viscosidad de una solución de polímero depende de su concentración y peso molecular, estos pueden formar agregados débilmente unidos en solución, que son suficientemente estables para acuñarse en las constricciones del revoque de filtrado. Estos mismos pueden adsorberse sobre la superficie de los granos de cemento y por lo tanto reducir el tamaño de los poros.

6.- Dispersante.

Las lechadas de cemento son suspensiones concentradas de partículas sólidas en agua donde el contenido de sólidos puede ser hasta un 70%. Las reologías de estas suspensiones depende de:

- El fluido intersticial entre las partículas.
- La Fracción de sólidos.
- La interacción entre partículas.

El contenido de sólidos de la lechada es función directa de la densidad de la lechada y las interacciones de las partículas dependen fundamentalmente de la distribución de cargas sobre la superficie.

Los dispersantes de cemento ajustan las cargas de las partículas sobre la superficie para obtener las propiedades reológicas deseadas. Estos aditivos son complejos químicos

aniónicos (grupo hidrófilico cargado negativamente), que se adsorben sobre la partícula de cemento y las repelen o sean las separan suspendiéndolas uniformemente en el agua de mezcla. Esta separación resulta en una menor resistencia al movimiento y a la mayor movilidad de las partículas, que sumadas al efecto lubricador del “agua libre” proporciona una disminución considerable de la viscosidad. Esto nos ayuda a inducir el flujo turbulento, lo cual es el propósito fundamental de estos aditivos, llamados también reductores de fricción.

Diseño de lechadas.

Son numerosos los factores que deben tenerse en cuenta al momento de diseñar una lechada de cemento, dadas las diferentes situaciones que pueden presentarse en cuanto a profundidad, temperatura, conjuntamente con la ejecución de una variedad de ensayos de laboratorio para poder predecir el comportamiento de la misma a medida que es bombeada y para asegurar su apropiada ubicación en el pozo.

Factores que afectan el diseño de una lechada.

- **Temperatura y presión de pozo.** Estos afectan el tiempo en que la lechada permanecerá bombeable y cómo desarrollará la resistencia a la compresión necesaria para soportar la cañería.

A medida que la temperatura de la formación aumenta, la lechada de cemento se deshidrata más rápidamente y por lo tanto disminuye el tiempo de bombeabilidad. La temperatura es también determinante sobre la cantidad de filtrado de la lechada, el agua libre y la resistencia a la compresión.

Hay dos temperaturas de referencia que deben ser determinadas:

- Temperatura estática de fondo de pozo (BHST).
- Temperatura de Circulación de fondo de pozo (BHCT).

a) Temperatura Estática de fondo de Pozo (BHST).

Es la temperatura natural de la formación bajo condiciones estáticas. Puede determinarse a partir de perfiles, ensayos de formación a pozo abierto o mediante mapas de gradientes disponibles para los distintos yacimientos. En este caso, debe considerarse que el uso de los mapas de gradientes es solo una estimación de la temperatura estática de fondo real, ya que para un pozo específico, la temperatura puede variar drásticamente del gradiente general del área a la que pertenece.

$$BHST = \frac{\text{Prof TVD(ft)} \times \text{grad. temperatura } (^{\circ} \frac{F}{100} \text{ ft})}{100} + \text{Temperatura ambiente } (^{\circ}F)$$

b) Temperatura de Circulación de fondo de Pozo (BHCT).

Se define como la temperatura que tendrá la lechada mientras es bombeada dentro del pozo. Ya que es constantemente se están bombeados fluidos fríos al pozo. La BHCT es considerablemente menor que la BHST. Esta temperatura se obtiene por medio de registradores de temperatura que se agregan a la sarta de perforación y que se bajan al pozo durante los acondicionamientos del lodo antes de bajar el casing.

○ **Viscosidad y contenido de agua de una Lechada de Cemento.**

Las lechadas de cemento deben tener una viscosidad o consistencia que ofrezcan un desplazamiento eficiente del lodo y permita una buena adherencia del cemento con la formación y el casing. Para lograr estos objetivos, la mayoría de las lechadas son mezcladas con una cantidad de agua tal que proveerá un volumen de cemento fraguado igual al volumen de lechada sin separación de agua libre.

Se debe considerar que, si bien el incremento en el contenido de agua permitirá mayores tiempos de bombeabilidad y retardo en el fragüe, el exceso podría producir.

- Discontinuidad del anillo de cemento (Se debe tener en cuenta que en una columna de cemento el exceso de agua libre se separa formando bolsas, en lugar de migrar en su totalidad hacia la parte superior. Esto puede observarse en ensayos de laboratorio con probetas de vidrio notándose la separación de anillos de agua que comienzan a formarse luego de que la lechada es colocada en la probeta).
- Colapso del casing en pozos inyectoros de vapor de agua.
- Percolación de gas a otras formaciones.
- Disminución de la resistencia a la compresión y a la corrosión.

Existen rangos de viscosidad para una lechada de cemento dada y rangos de viscosidad que gobiernan cuan espesa puede ser una lechada y seguir bombeable bajo ciertas condiciones de pozo. Estas cantidades de agua definen a continuación:

Agua Máxima. Es la cantidad de agua requerida para una determinada composición de lechada, que proporcionará un volumen fraguado igual al volumen de lechada con un máximo de 1.5 % de agua libre.

Esta cantidad de agua es la que generalmente se utiliza en la mayor parte de las cementaciones, ya que es la que proporciona el máximo rendimiento.

Agua Normal. Es la cantidad de agua de mezcla que produce una lechada de 11 unidades de consistencia (11 Bc) después de ser mezclada y agitada en el consistómetro durante 20 minutos. Esta cantidad se denomina también “agua óptima” porque provee una muy buena lechada y fácilmente bombeable.

Agua Mínima. Es la cantidad de agua que provee una lechada de cemento de 30 unidades de consistencia (30 Bc), después de ser mezclada y agitada en el consistómetro atmosférico durante 20 minutos. Esta cantidad representa una lechada muy espesa y viscosa, que puede utilizarse por ejemplo para controlar pérdida de circulación.

○ **Tiempo de Bombeabilidad.**

El tiempo de bombeabilidad requerido para un caso en particular depende de las condiciones del trabajo, tipo de cementación, condiciones del pozo, volumen de cemento, etc. Y debe ser suficiente como para mezclar la lechada, bombearla dentro del pozo y ubicar la misma. Generalmente se incluye además un adecuado factor de seguridad.

Los principales factores que afectan el tiempo de bombeabilidad son la presión y la temperatura de circulación, siendo la temperatura el parámetro que más influye.

Sin embargo, debe tenerse en cuenta que el tiempo de bombeabilidad también está afectado por condiciones que no siempre pueden controlarse durante el ensayo de laboratorio, tales como:

- Invasión de agua.

- Pérdida de agua hacia formación.
- Paradas durante la operación de campo (durante la cementación, cualquier parada en el bombeo de lechada causará que la misma comience a desarrollar resistencia de gel al reiniciarse el bombeo se requerirá una energía adicional para ponerla nuevamente en movimiento. Si el tiempo estático ha sido prolongado, la lechada puede haber desarrollado tal resistencia de gel que incluso no pueda reiniciarse el bombeo, aunque se esté dentro del tiempo de bombeabilidad por el ensayo).

○ **Resistencia a la Compresión.**

El cemento requiere una determinada resistencia a la compresión para soportar una sarta de casing. Investigaciones han demostrado que una columna de cemento de 10 ft, teniendo solamente 8 psi de resistencia a la tensión, puede soportar más de 200 ft de casing, aún bajo pobres condiciones de adherencia del cemento.

Como regla general, la resistencia a la compresión es de 8 a 10 veces mayor la resistencia a la tensión; es decir que una resistencia a la tensión de 8 psi equivalente a 80 a 100 psi de resistencia a la compresión. Generalmente se acepta en la industria del petróleo que una resistencia a la compresión de 500 psi es adecuada para la mayoría de las operaciones.

Para decidir cuánto tiempo esperar el fragüe del cemento (WOC time, Wait on cement time), es importante conocer las características de desarrollo de resistencia a la compresión de los cementos, comúnmente utilizados. La lechada de cemento una vez fraguada, debe tener suficiente resistencia para soportar el casing en el pozo, excluir fluidos indeseables y soportar esfuerzos posteriores de perforación y fractura hidráulica.

○ **Requerimiento de Agua.**

Es conocida como “Agua de mezcla”. La cantidad de agua de mezcla usada para hacer lechada de cemento puede observarse en la Tabla 2.2 Estas cantidades están basadas en:

- La necesidad de tener una lechada que sea fácilmente bombeada.
- La necesidad de hidratar todo el cemento de manera de producir un cemento de alta calidad y dureza.
- La necesidad de asegurar que toda el agua libre sea usada para hidratar el cemento y que exista presencia de agua libre en el cemento fraguado.

Clase API	Agua de Mezcla (gal/Sx)	Densidad de Lechada (lb/gal)
A	5,2	15,6
B	5,2	15,6
C	6,3	14,8
D	4,3	16,4
E	4,3	16,4
F	4,3	16,2
G	5,0	15,8
H	4,3	16,4

Tabla 2.2 Requerimiento de agua en los tipo de cemento API

Las cantidades de agua de mezcla obtenidas en la Tabla N° 2.2 son valores promedios para diferentes clases de cementos.

2.2.4 Remoción de lodos.

Un desplazamiento incompleto del lodo puede dejar un canal continuo a través de las zonas de interés, permitiendo una comunicación interzonal. Además, la contaminación del cemento con el lodo no desplazado, con los lavadores y/o espaciadores durante su proceso de colocación puede ocasionar: Lodo gelificado, cemento de baja resistencia a la compresión, cemento de alta permeabilidad, extremadamente retardado, migración de fluidos.

Esta remoción es un proceso de 3 pasos, a seguir antes de cementar.

- **Limpieza del Hoyo.**

Con el fin de obtener unas propiedades homogéneas (entrada y salida del pozo) en el lodo antes de la cementación, este debe ser circulado por lo menos dos volúmenes del hoyo a un caudal que permita el flujo alrededor de todo el anular (Mínimo caudal de circulación de lodo en un anular excéntrico) o al más alto caudal anular esperado durante la cementación. Lo importante es asegurarse que la velocidad anular durante la circulación nunca exceda la velocidad anular en la sección del hoyo abierto.

Considerar viajes de limpieza, y una circulación mayor a 95% del volumen total del hoyo.

- **Acondicionamiento del lodo de perforación.**

Un pozo perforado en forma deficiente puede tener zonas desmoronadas, que son difíciles de limpiar y puede contener partículas de fluido gelificado, para evitar este comportamiento, se pide reducir, **el límite de elasticidad, la viscosidad plástica y la resistencia de gel.**

- **La reología del lodo** puede reducirse mediante el agregado de agua o **dispersantes** al sistema y circular el fluido hasta que sus propiedades alcancen el rango deseado. Esto requiere de la circulación de un volumen ya modificado con los dispersantes o agua en el pozo como mínimo y en la medida de lo posible, deberá efectuarse antes de remover la columna de perforación para evitar que el lodo se gelifique mientras se encuentra estacionario durante las operaciones de extracción de tubería

- **Desplazamiento del lodo del espacio anular.**

Optimizar la colocación de la lechada en el espacio anular, soportado por una buena centralización (STO > 75%) y el movimiento del casing.

Criterios para una remoción de lodo efectiva.

- Movimiento del Casing.
- Centralización del Casing.
- Dispositivos Mecánicos: Tapones
- Sistema de Pre flujos: Lavadores y Espaciadores.
- Selección del régimen de flujo.

2.2.4.1 Movimiento del Casing

El movimiento del Casing, (Reciprocación y/o rotación) desde el acondicionamiento del lodo hasta el final del desplazamiento del cemento ayuda a romper el lodo gelificado y cambia la

geometría del flujo. De esta forma se mejora tanto la eficiencia de circulación como el desplazamiento.

Rotación	Reciprocación
Movimiento circular del casing.	Movimiento del casing hacia arriba y abajo durante el trabajo.
Desde el inicio de circulación hasta el final del desplazamiento.	Carrera de 20 a 40 ft.
10 a 40 rpm.	1 a 5 minutos por ciclo
Necesita cabezales de rotación y swivels	Excesivas presiones por el efecto pistón pueden ser creadas.
El torque debe ser monitoreado muy de cerca.	Tensión y deformación excesivas del casing.

Tabla 2.3 Características de Movimiento del Casing

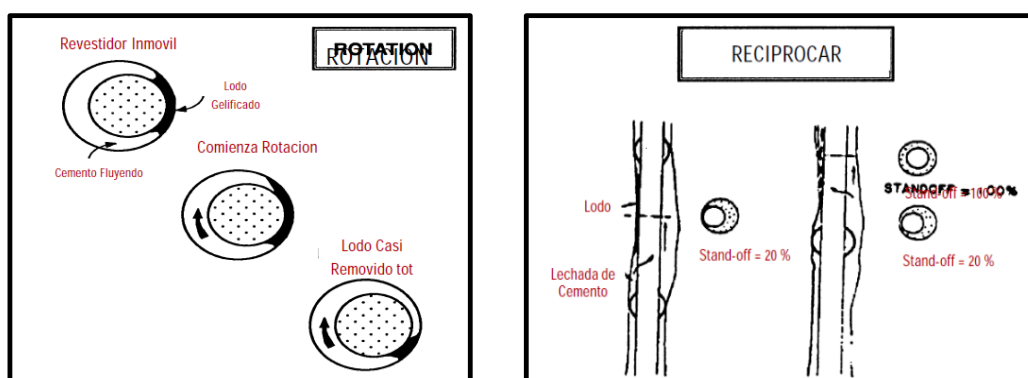


Figura 2.2 (a) Movimiento de Rotación y b) Movimiento de Reciprocación.

2.2.4.2 Centralización del casing.

El centrado de la tubería es un factor importante para obtener una alta eficiencia de desplazamiento y a la par una efectiva remoción, está permite igualar la distribución de las fuerzas ejercidas por la lechada de cemento conforme fluye por el espacio anular, de lo contrario el cemento tiende a seguir la trayectoria de la menor resistencia, hacia el lado ancho del espacio anular.

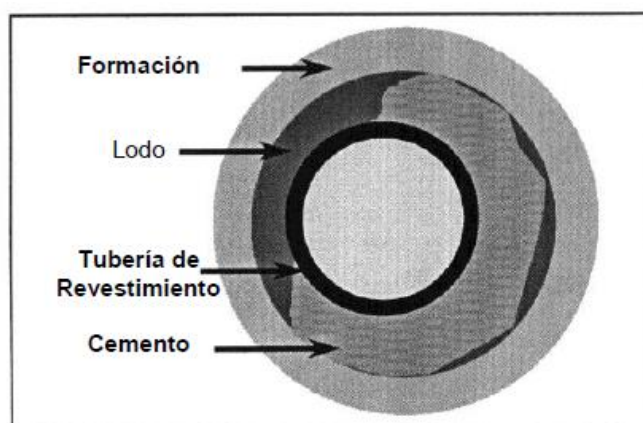


Figura 2.3 El cemento tiende a fluir por el lado ancho del espacio anular.

La condición de centralización se determina mediante el **Stand Off**, el cual se relaciona a la excentricidad del casing dentro del pozo. La colocación de centralizadores considera un buen stand off en las zonas susceptibles a pegas por presión diferencial (zonas permeables), y severidad de pozo (Pata de Perro).

La experiencia en la práctica demuestra que un stand off con valor entre el 75% - 100% es adecuado. A fin de determinar la cantidad optima, se recomienda el uso de un simulador.

Ventajas de un casing centralizada.

- Fabricados con las máximas exigencias y controles, superando las especificaciones de la Norma API RP 10 D.
- Mejora la eficiencia de desplazamiento (Excentricidad Mínima).
- Reduce el riesgo diferencial de atrapamiento.
- Previene problemas clave de asentamiento.
- Reduce el coeficiente de arrastre (running forcé) en pozos direccionales.
- Alta respuesta elástica de centrado (restoring Forcé), que mejora efectivamente condiciones de la cementación.

• **Variaciones de Flujo Relativas como funcion de la excentricidad**

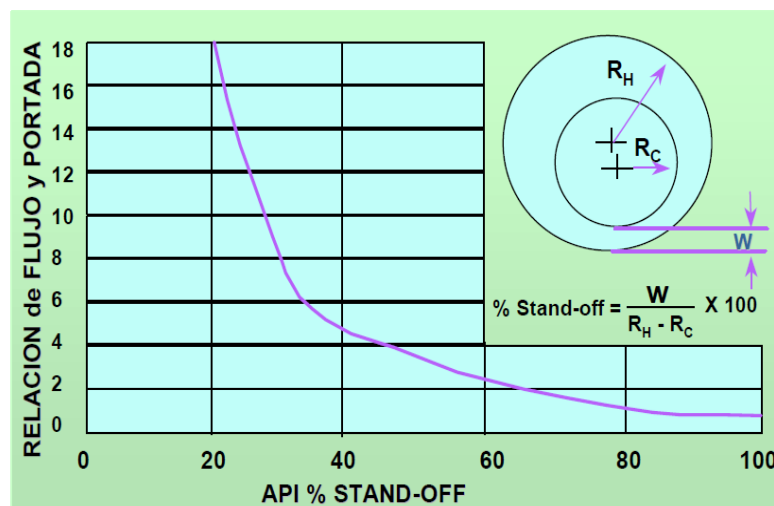


Figura 2.4 Centralizador del Casing, cortesía de Schlumberger, 2014

Un aumento de la velocidad relativa, se puede generar presiones indebidas (por pérdidas de carga), que puede generar pérdidas de circulación en zonas debajo gradiente de fractura.

Los flejes que unen los anillos tienen una curvatura hacia afuera para hacer contacto con la pared del pozo. Los tipos de centralizadores, son:

- **Centralizador Tipo Arco de Resorte (Bow Spring)**

El centralizador tipo arco de resorte (Bow Spring) tiene una mayor capacidad para proporcionar un alejamiento con respecto a las paredes del pozo en las secciones donde esta ensanchado o lavado.

Un buen alejamiento de la tubería con respecto a la pared del pozo (Stand off) ayuda asegurar un patrón de flujo uniforme alrededor del casing y ayuda a igualar la fuerza

que ejerce el cemento que fluye alrededor del mismo, aumentando la capacidad de remoción de los lodos.

Cuando los caudales de bombeo son óptimas un mejor desplazamiento del lodo de perforación se logra cuando las tolerancias anulares son aproximadamente 1 a 1.5 pulgadas. La cementación efectiva es importante a través de los intervalos de producción y alrededor de las juntas inferiores de los casing de superficie e intermedios para minimizar la probabilidad de pérdida.

- **Centralizador Tipo Rígido (Rigid Type).**

Este tipo de centralizador proporciona un alejamiento positivo con respecto a las paredes de pozo cuando este está en calibre. Los centralizadores tipo positivo son $\frac{1}{4}$ a $\frac{1}{2}$ pulgadas de diámetro menor que el tamaño del hoyo donde se usan y, por lo tanto no generan ninguna fuerza arrastre.

Son comúnmente utilizados en pozos horizontales, debido al alejamiento positivo con respecto a las paredes de pozo, son no flexible O.D (ligeramente menor que el ID del casing anterior).



Figura 2.5 Tipos de Centralizadores, cortesía de Schlumberger, 2014

El diseño de los centralizadores, varía considerablemente, dependiendo de propósito de su aplicación y el vendedor. Por esta razón, las especificaciones API cubren requisitos de rendimiento mínimo para centralizadores de tipo resorte para tolerancias estándar y exigentes.

Las más importantes definiciones de la norma API 10D son:

- **Fuerza de inicio al movimiento (Starting Force).** Es la máxima fuerza necesaria para inducir el movimiento de un centralizador dentro de un casing previamente instalado en un pozo. La máxima fuerza de cedencia para cualquier centralizador debe ser menor que el peso de 40 pies de una junta de casing.

- **Fuerza de Corrida (*Running force*)** Es la máxima fuerza necesaria para mover un centralizador a través de un casing previamente instalado. La fuerza de corrida es proporcional y siempre igual o menor que la fuerza de inicio al movimiento. Es un valor práctico que da el máximo “arrastre de corrida” producido por un centralizador en el tamaño de hoyo más pequeño especificado.
- **Fuerza de Restauración (*Restoring Force*)** es la fuerza ejercida por un centralizador contra el casing para mantenerlo lejos de la pared del pozo. La fuerza de restauración requerida por un centralizador para mantener adecuado “Stand Off” es pequeña en un agujero vertical pero substancial para el mismo centralizador en pozos desviados (25° - 65° de inclinación) De acuerdo a la geometría del hoyo, las fuerzas de restauración pueden generar fuerzas de fricción entre el casing y la pared del pozo en hoyos apretados, impactando los esfuerzos de arrastre.

La norma API 10D, considera que el alejamiento de la tubería con respecto a las paredes del pozo (Stand Off) debe ser 67% como mínimo recomendable.

2.2.4.3 Dispositivos Mecánicos: Tapones

Los tapones de cemento son utilizados para separar la lechada de cementación del espaciador o lodo y prevenir la contaminación. En corridas de casing, tapones adicionales son bombeados antes y entre el tren de espaciadores para minimizar la contaminación causada por varios regímenes dentro de diferentes espaciadores y para maximizar su efectividad cuando salga hacia el espacio anular.

Los tapones son normalmente fabricados de goma. Varios aparatos propios son utilizados para “enganchar” los tapones unos a otros para permitir una perforación más fácil.

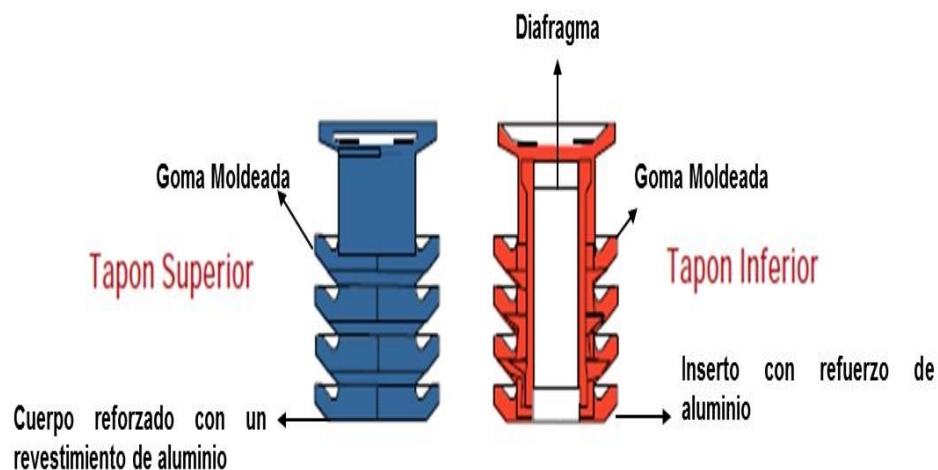


Figura 2.6 Tipos de tapones, cortesía de Schlumberger, 2014

2.2.4.4 Selección de Régimen de Flujo.

Dos regímenes de flujo se puede dar cuando aumenta el caudal en una tubería: laminar y Turbulento. Existen tres modelos matemáticos básicos que representan el comportamiento del fluido, es decir la relación entre el esfuerzo de corte (Ψ) y la velocidad de corte (Caudal o N_{re}) \ddot{y} .

En los tres modelos, el flujo laminar existe a bajos caudales. Al incrementar el caudal, se pasa por una zona difícil de caracterizar “zona de transición” (a diferentes velocidades de corte para diferentes modelos) y finalmente se alcanzan el flujo turbulento a altos caudales.

FLUJO LAMINAR	FLUJO TURBULENTO
Velocidad de flujo moderada.	Velocidad de flujo altas.
El fluido fluye en línea recta y en paralelo al centro de la tubería	Perfil recto de velocidades, pero con movimientos en forma de remolinos
La velocidad del fluido en la pared de la tubería es cero.	Punto de velocidad máximo indefinible.
Máxima velocidad en el centro de la tubería.	Se establece a temperaturas que no pasen el punto de ebullición.

Tabla 2.4 Características de los tipos de flujo

En flujo laminar, las curvas concuerdan con modelos (Newtoniano, No Newtoniano: Plástico de Bingham, Ley de potencias), con excepción del modelo Plástico de Bingham, en el cual existe una relación no lineal de baja velocidad de corte, en flujo turbulento, los tres modelos se desvían del comportamiento real del fluido.

El fluido Newtoniano, es usado para describir el comportamiento de los fluidos como agua y otros lavadores químicos, estos fluidos se caracterizan por que su viscosidad permanece constante a toda velocidad de corte. El esfuerzo de corte es directamente proporcional a la velocidad de corte.

Modelo de Plástico de Bingham.

Este modelo describe un fluido en el cual se requiere una fuerza finita para iniciar el flujo, es decir, el punto cedente y que luego demuestre una viscosidad constante cuando la velocidad de corte aumenta, conocida como viscosidad plástica.

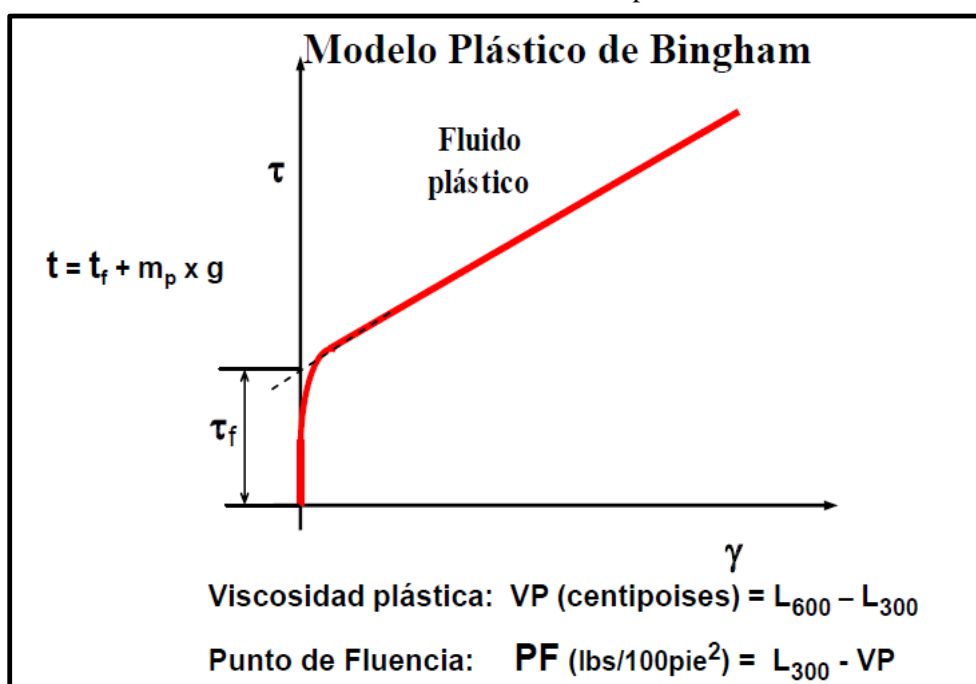


Figura 2.7 Modelo Reologico, Plástico de Bingham.

Modelo de la Ley de Potencia o Ley Exponencial.

Describe un fluido en el cual el esfuerzo de corte aumenta según la velocidad de corte elevada matemáticamente a una potencia determinada.

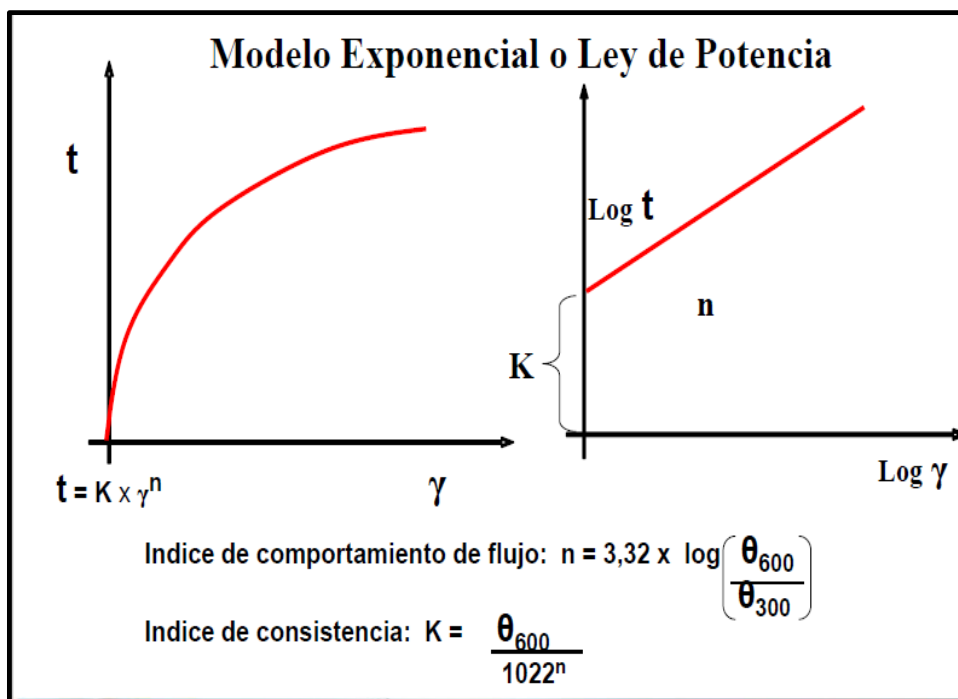


Figura 2.8 Modelo Reológico, Exponencial o Ley de Potencia.

Un caso especial, es el flujo turbulento no es la mejor opción en formaciones débiles o muy pocos consolidadas, una turbulencia excesiva puede ocasionar problemas de estabilidad además en formaciones débiles o muy poco consolidadas, una turbulencia excesiva puede ocasionar problemas de estabilidad además en formaciones muy depletadas y permeables se puede producir una deshidratación excesiva debido al mayor diferencial de presión aplicado al fluido en contacto con la formación.

Las principales limitaciones para alcanzar flujo turbulento son: la reología del fluido, las condiciones de pozo y el equipo de bombeo. Los fluidos usados para este tipo de flujo son: lavadores y espaciadores especialmente diseñados, en los cuales los esfuerzos generados por la viscosidad y densidad son pequeños, es el efecto de remolino sobre las partículas del fluido lo que mantiene un perfil de velocidad plano. La turbulencia crea un efecto de arrastre/erosión/dilusión en la interface del fluido y el intercambio de fluidos entre la parte ancha y la parte angosta del anular, crea una fuerza de arrastre capaz de romper o dispersar bolsas de lodo deshidratado o lodo estacionario gelificado.

El diferencial de densidad no es un factor importante cuando se usa el flujo turbulento como es evidenciado por un efectivo desplazamiento de lodo (más pesado) por agua, sin embargo supone el uso de un fluido desplazante de menor viscosidad que el lodo que podría canalizar en flujo laminar si el flujo turbulento no es alcanzado en todo el anular.

Si existe un problema de control de pozo, se deben usar espaciadores para flujo turbulento y adicionalmente pequeños volúmenes de lavador no solo espaciador ya que el lavador

adelgaza el lodo delante del espaciador o de la mezcla de cemento además deja la tubería/formación mojada al agua.

Estudios de campo han mostrado que incrementando el tiempo de contacto se mejora la remoción del lodo (tiempo de contacto durante el cual una sección de la formación está en contacto con el fluido en turbulencia). 10 minutos de tiempo de contacto es lo óptimo recomendado (sin embargo, si las condiciones del pozo son favorables se puede tener hasta 5 minutos como mínimo) o un volumen de lavador de 750 ft en el anular.

2.2.5. Sistema de Pre Flujos.

Factores que influyen en la selección de lavadores, espaciadores.

La presión poral, son parámetros de gran utilidad para la cementación de pozos, estas pueden ser estimadas de la densidad de lodo a esas profundidades, una vez que son conocidas pueden ser usadas para determinar la mínima presión hidrostática que se debe ejercer durante el trabajo de cementación.

La situación más peligrosa para el control del pozo ocurrirá cuando el fluido de menor densidad (Comúnmente agua fresca, lavador) pasa en frente de alguna zona activa. Dependiendo de la configuración del anular(o diámetro de pozo) encima se reduce o incrementa el impacto de un fluido de baja densidad en el neto de presión hidrostática.

Las pérdidas de circulación. Están definidas como pérdidas totales o parciales de fluidos de perforación en zonas de alta permeabilidad, formaciones cavernosas, fracturas naturales o inducidas, zonas de grava, etc. Ya sea durante el proceso de perforación o el de cementación, las consecuencias de una pérdida de circulación, puede ser:

- Posible reventón debido a la pérdida de nivel de lodo en el pozo.
- Posibilidad de atasque de la tubería de perforación debido a una pobre remoción de los recortes.
- Pérdida de aislamiento zonal debido a un insuficiente llenado de cemento.
- Daño irreparable a la formación productiva.

Tipos de Pérdida	Severidad
Filtrado(menor)	< 10 bbl/hrs.
Parcial(media)	10 – 500 bbl/hr
Completa(severa)	Total, imposible mantener pozo lleno

Tabla 2.5 Pérdida de Circulación.

Uno del sistema más utilizado dentro de las operaciones del Nor oeste de Perú, puede ser soluciones a base de silicatos que al contactar soluciones de calcio forman un gel semi – permanente que permite reducir las pérdidas de fluido durante la colocación del cemento. Estas soluciones pueden formar también un sello permanente en contacto con el cemento.

Diseños de lavadores y espaciadores.

En un trabajo de cementación se necesita un completo desplazamiento de lodo por la mezcla de cemento. El contacto de estos dos fluidos puede resultar en una masa viscosa en la interface ya que son frecuentemente son incompatibles. Cuando se produce esta gelación del lodo la mezcla del cemento tiene a canalizarse o bypasear el lodo viscoso y/o crear altos caudales de bombeo que pueden fracturar las formaciones débiles.

Los lavadores y espaciadores están diseñados para separar el lodo y el cemento, deben ser compatibles con ambos fluidos, desplazar el lodo de perforación y mantener el control hidrostático del pozo durante la operación.

Estos pre flujos, deben poseer ciertas propiedades para funcionar adecuadamente.

- La compatibilidad con fluidos del pozo, como es el fluido de perforación y cemento.
- Separar baches de diferentes fluidos.
- Remover el lodo de perforación.
- Proteger formaciones.
- Controlar presiones.
- Inhibir el daño a arcillas y calizas sensibles al agua.
- No afectar adversamente propiedades del cemento o lodo.

Lavadores.

Son fluidos con una viscosidad y densidad cercana a la del agua. Barren el lodo móvil y además dispersan y adelgazan el lodo residual dejando en las paredes de la tubería y de la formación. Puede ser fácilmente en flujo turbulento y algunas veces pueden ser acompañados por un espaciador con el fin de remover los recortes remanentes.

Los Aditivos son:

Solventes, Remueven la película de petróleo de la tubería y/o formación.

Surfactante. Dispersa el lodo y además deja la tubería mojada al agua.

Soda Caustica. Adicionarle este producto químico permite elevar el Ph al sistema, obteniendo favorables resultados cuando esta solución se bombea delante de la lechada de cemento a volúmenes equivalentes a un tiempo de contacto de 10 minutos

Espaciadores. Son fluidos de alta densidad. Su uso es recomendado cuando los lavadores generan problemas de control de pozo. Un buen espaciador deben tener las siguientes propiedades:

- **Densidad y Reología Controlada**. Los espaciadores son más eficientes en flujo turbulento debido al efecto de erosión de las partículas del fluido, sin embargo su densidad y viscosidad deben ser optimizadas para minimizar sin comprometer la suspensión del agente de peso a las temperaturas de fondo requeridas.
Sus aditivos, se muestran en:
- **Viscosificante**. Suspende los agentes de peso y controlan las propiedades reológicas.
- **Dispersantes**. Mejora la compatibilidad Espaciador – Lodo – Mezcla de cemento.
- **Surfactante**. Adelgazan y dispersa el lodo y deja la tubería mojada al agua.

Elaboración y evaluación de pruebas de laboratorio para determinar la eficiencia de baches lavadores y espaciadores.

Cuando se selecciona un fluido lavador y un fluido espaciador, para efectuar un eficiente desplazamiento del lodo, deberán tomarse en consideración los siguientes criterios:

- a) Reología del fluido espaciador y caudal de bombeo.
- b) Compatibilidad del fluido espaciador con el lodo y el cemento.
- c) Características de mojabilidad del fluido espaciador.

- d) Densidad y contenido de sólidos en suspensión.
- e) Tiempo de contacto.
- f) Predeterminar la posición de los baches limpiadores en relación con el lodo, fluido espaciador y el cemento.

Para llevar a cabo los puntos anteriores, es necesario conocer las siguientes características de los fluidos lavadores y fluidos espaciadores: *Reología, Tixotropía, Densidad, Compatibilidad entre los fluidos desplazados, Mojabilidad.*

Reología, un criterio importante es desplazarlo en flujo turbulencia a caudales de bombeo razonables para la geometría que presenta el pozo.

A fluidos con alta densidad, se utiliza el modelo de Ley de Potencias para calcular los caudales críticos y las pérdidas de presión por fricción.

Tixotropía. Forma una estructura de gel cuando están estáticos. Regresando luego al estado de fluido cuando se aplica un esfuerzo de corte. La mayoría del pre flujos demuestra esta propiedad debido a la presencia de partículas cargadas eléctricamente o polímeros especiales que se enlazan entre sí para formar una matriz rígida.

La resistencia del gel formado depende de la cantidad y del tipo de sólidos en suspensión, del tiempo, de la temperatura y del tratamiento químico.

Caudal mínimo de Bombeo, Se debe calcular el caudal mínimo de bombeo con el que se obtendrá flujo turbulento, de acuerdo a la ley de potencia.

Densidad del fluido espaciador y contenido de sólidos en suspensión. Se acostumbra que el fluido espaciador sea de una densidad de 0.5 lb/gal mayor que la del lodo. Aunque los fluidos espaciadores de mayores espaciadores pueden ser no perjudiciales, pues estos serán más costosos. Los fluidos espaciadores de mayor densidad también pueden crear mayores densidades de circulación durante la colocación del cemento.

El polímero dentro del sistema, rompe las uniones con la temperatura, permitiendo así reducir la viscosidad del fluido espaciador durante la colocación.

Compatibilidad. Para determinar el grado de compatibilidad de los fluidos de perforación y cementación. Este proceso incluye reología, esfuerzo de gel estático, tiempo de bombeabilidad, resistencia a la compresión, pérdida de fluido y suspensión de sólidos.

2.2.6 Registro de Calidad de Cemento – VDL – CBL

Estos registros sirven para detectar las condiciones del cemento en el espacio anular comprendido entre el casing y pared del pozo, en una cementación primaria, ya sea la que se hace para fijar el casing en el pozo luego de ser perforado como después de alguna reparación, a continuación se detalla los siguientes registros.

Registro CBL (Cement Bond Long), Llamado también registro de Adherencia de cemento, lo cual nos indica la integridad de la adherencia entre el casing y la pared del pozo.

El registro es comúnmente obtenido de una variedad de herramientas de tipo sónico o acústico. Su funcionamiento se basa en que un transmisor envía ondas acústicas para luego ser recibidas por Receptores en forma de señales acústicas que se transfieren a través del casing hacia el cemento y se reflejan hacia los receptores. La onda acústica en los receptores

se convierte en amplitud (mv). Bajas amplitudes representan una buena integridad del cemento entre el casing y la pared de pozo, sin embargo las altas amplitudes representan una mala integridad del cemento.

Como propósito principal de estas mediciones, se tiene que el registro CBL no mide el sellado hidráulico en forma directa, pero las cualidades de adherencia medidas permiten realizar inferencias respecto a la calidad del sellado. La determinación de la integridad del cemento se realiza mediante el análisis de la forma de onda acústica en su totalidad, de las amplitudes de los arribos de casing, y a través de la medición del tiempo de transito del receptor único.

Sistema de medición acústica.

Existen una variedad de ondas acústicas que se propagan en forma esférica desde el transmisor. Pero solamente dos de ellas tienen relevancia práctica para el perfilaje de cemento.

Las ondas compresionales. Se transmite a través del movimiento hacia adelante y hacia atrás de las partículas en la dirección de desplazamiento de la onda. Se puede transmitir a través de líquidos y sólidos (Columna de lodo, casing, cemento, formación) y su amplitud(a través del casing) provee una indicación de la adherencia del cemento. Es posible predecir con facilidad el arribo la onda compresional al receptor.

Las ondas de corte. Se transmite a través de un movimiento de partículas que es perpendicular a la dirección de propagación de la onda.

Cuando las condiciones de adherencia de cemento son buenas, tanto la onda compresional con la onda de corte se propagan al interior del solido ubicado en la interfaz cemento/formación y pueden ser detectadas por el receptor.

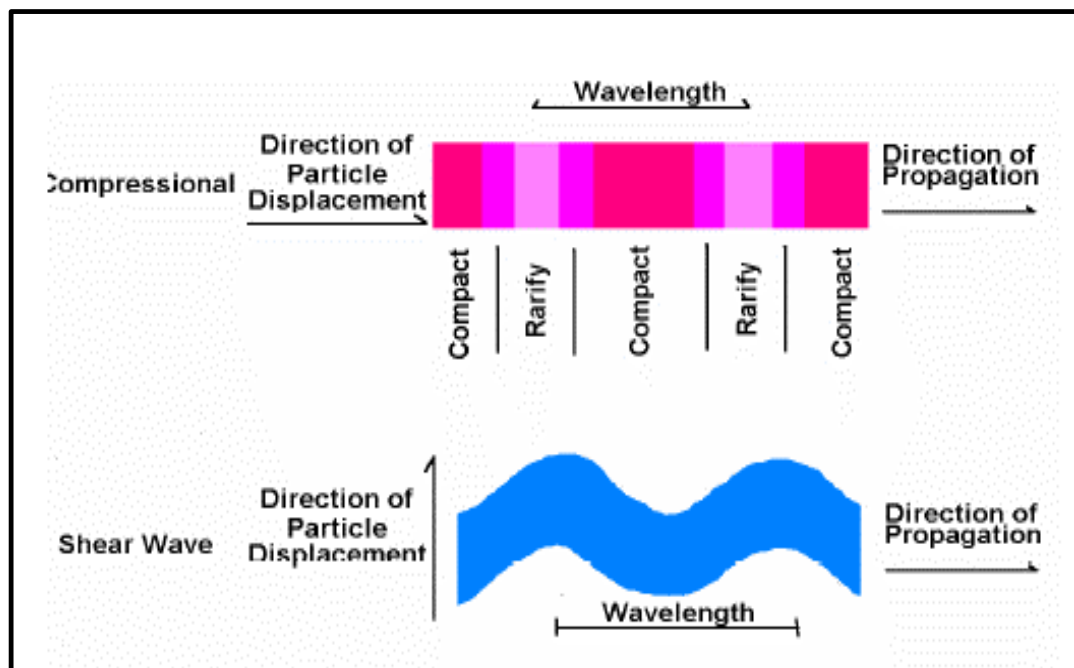


Figura 2.9 Ondas de medición acústica.

Cuando el transmisor se activa, la onda compresional recorre una variedad de trayectorias. Se propaga hacia abajo por la carcasa de instrumento y en sentido horizontal y vertical por el fluido en el interior del pozo. Cuando la onda choca contra la pared interior del casing, parte de la energía es reflejada y el resto se transmite al acero, al anillo de cemento y a la formación. En cada una de estas interfaces, parte de la energía es reflejada y el resto se transfiere al medio adyacente.

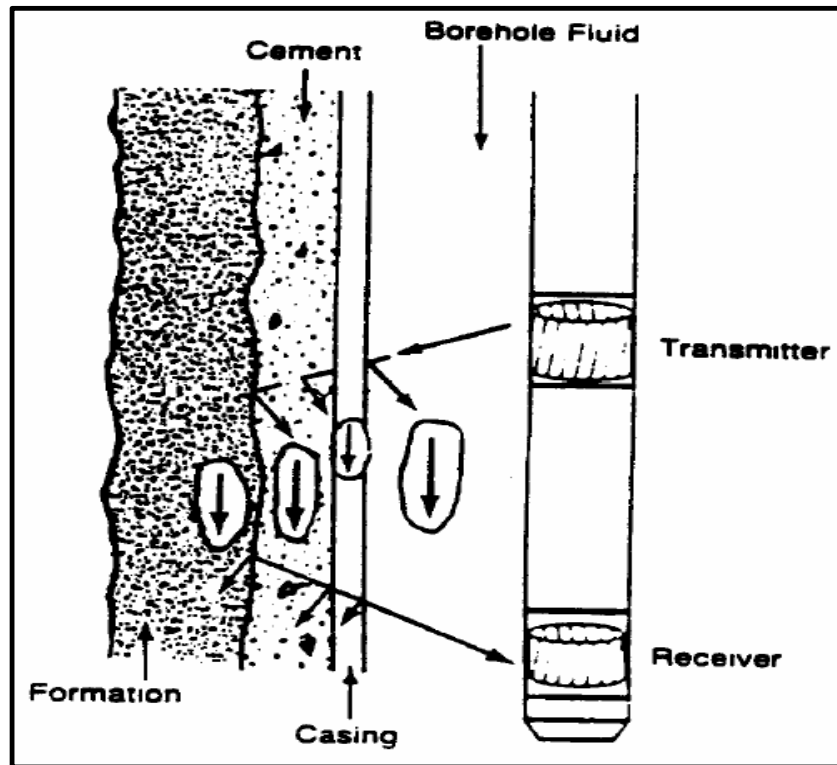


Figura 2.10 Transmisión de la onda acústica

Con respecto a los receptores, el de 3 pies brinda la máxima señal y una alta resolución además de la máxima resolución vertical y ha sido recomendado por la *Cement Bond Advisory Board del API*, al considerarlo aceptable para realizar mediciones de amplitud y tiempo de tránsito.

El receptor de 5 pies se emplea para registrar las formas de onda de Densidad variable.

Como ya se ha mencionado, la señal acústica recorre múltiples trayectorias a través de medios diferentes para desplazarse del transmisor al receptor. Cada uno de los medios permite que las ondas acústicas se desplacen a una velocidad específica; por lo tanto, en general, las señales provenientes de diferentes trayectorias arribarán al receptor en tiempos diferentes. La velocidad acústica en una formación específica se reduce (el tiempo de tránsito aumenta) a medida que aumenta la porosidad de la formación. En general la porción de la forma de onda que se transmitió por el casing arribará en primer lugar, seguido de las que se desplazaron por el cemento, por la formación y, por último, por el fluido.

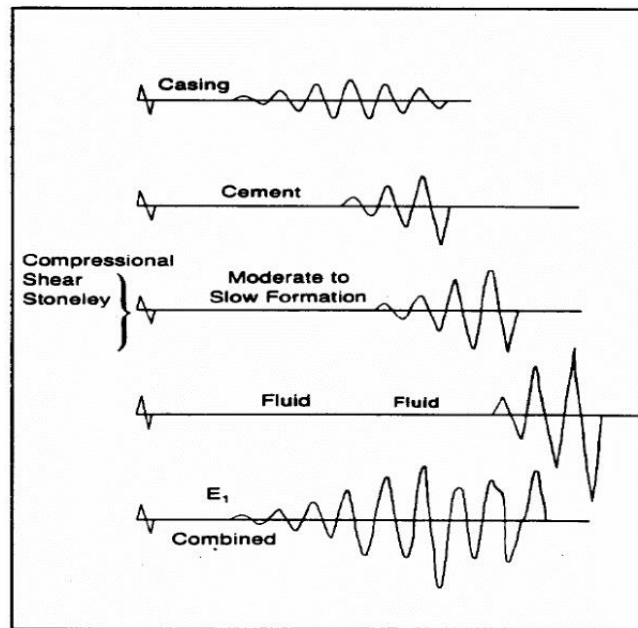


Figura 2.11 Arribo de Ondas acústicas.

La amplitud. Está relacionada con la cantidad de energía acústica en el receptor, y es a partir de este dato que se obtiene soluciones cuantitativas de la resistencia a la compresión y de índice de adherencia del cemento. La energía de la forma de onda acústica sufre una atenuación a medida que recorre la distancia entre el transmisor y el receptor, esta atenuación equivale a una pérdida de energía, que generalmente se expresa en decibeles por pie.

La medición es representativo del primer arribo positivo (E_1) en el receptor cercano. Esto se logra mediante el uso de una compuerta abierta y fija que se coloca en el primer periodo pronosticado de arribo de casing (E_1).

Se debe establecer la sincronización de la compuerta de amplitud, que dependerá del tamaño y peso del casing.

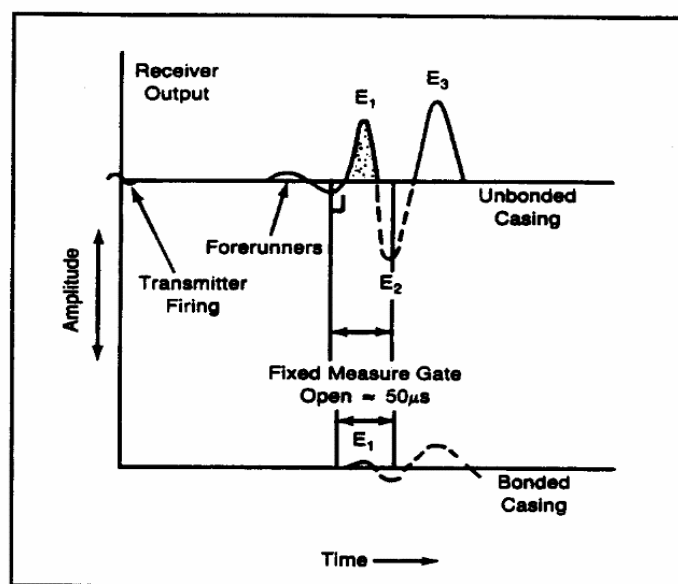


Figura 2.22. Arribos de Amplitud.

La interpretación de la adherencia del cemento, se calcula a partir de la amplitud de la siguiente manera:

- Una elevada amplitud indica que el casing puede vibrar con relativa libertad; por lo tanto, no la adherencia o sostén no son buenos.
- Una amplitud baja indica que el casing está más confinado o adherido, lo que provoca la atenuación de la energía de la onda por parte de los medios circundantes.
- Las mediciones de amplitud que se encuentran entre los valores máximos y mínimos determinan un porcentaje de adherencia del casing.

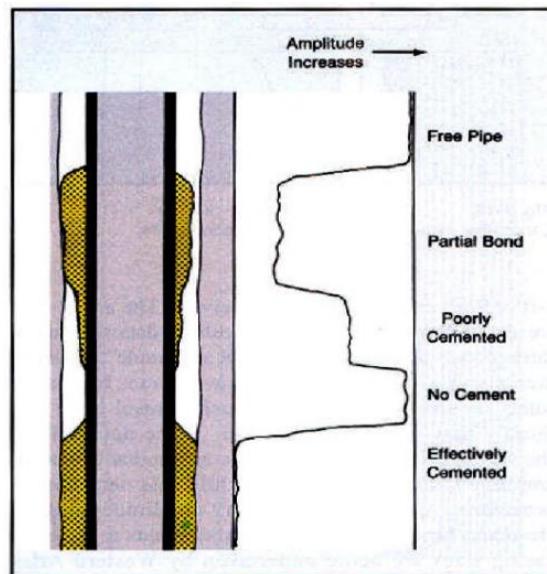


Figura 2.33 Interpretación de señales de amplitud.

Tiempo de Transito. Representa el tiempo requerido para detectar el primer pulso de suficiente amplitud en el receptor, es de utilidad para determinar la centralización de instrumento y los efectos de formación rápida.

Para este procedimiento se emplea un sistema de detección de compuerta flotante, esta se mantiene abierta desde el momento de la emisión del transmisor hasta que se encuentra un pulso cuya amplitud es suficiente para alcanzar la configuración de nivel de umbral, luego, esta respuesta se registra como el tiempo del primer arribo acústico.

Generalmente se establece un valor considerable menor al 10% de la amplitud de la tubería libre.

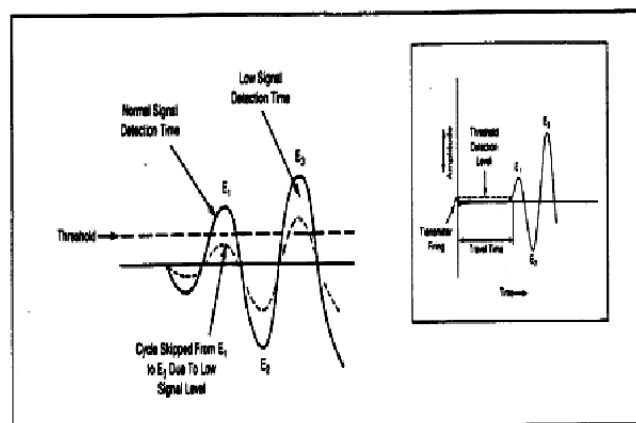


Figura 2.44 Respuesta de Tiempo de Transito.

Registro de Densidad Variable (VDL)

Es una señal de eje Z con modulación de intensidad que exhibe la amplitud de la forma de onda recibida mediante matices variables de blanco al negro, en la figura N° 15, se muestra el desarrollo del perfil VDL; el color negro representa una amplitud positiva elevada y el blanco una amplitud negativa; los matices de gris representan las diferentes intensidades de amplitud positiva.

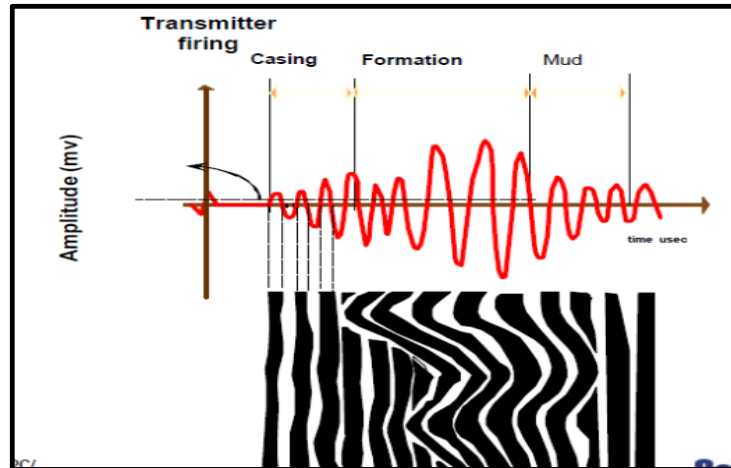


Figura 2.55 Traducción del perfil de señal acústica a partir del perfil de densidad variable

La ventaja de esta presentación consiste en que brinda una visión continua del pozo y permite identificar los arribos de casing, de formación y de fluido; si estas señales pueden identificarse en forma individual, es posible establecer una determinación práctica de la presencia y ausencia de cemento.

- La señal de casing en el perfil VDL se produce con un tiempo relativamente constante y se observa como líneas muy rectas.
- Es posible reconocer los arribos de fluido o de lodo como arribos de líneas relativamente rectas.
- Finalmente, los arribos de formación exhibirán cierto carácter (es decir no son rectos) y aparecerán en los intervalos de casing esperados.

Sin embargo en formaciones duras de baja porosidad (formaciones rápidas) pueden mostrar tiempos de arribo homogéneos en un intervalo de profundidad y producirse al mismo tiempo o antes que los tiempos de arribo esperados para el casing.

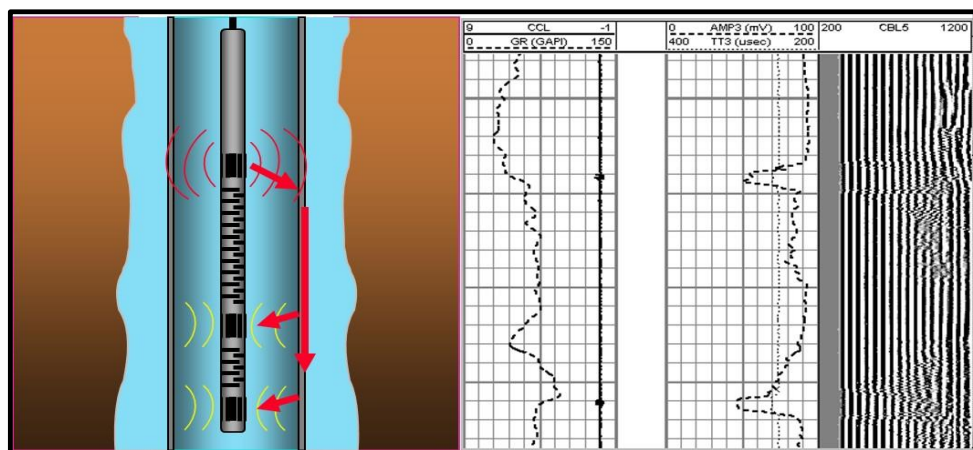


Figura 2.66 Ejemplo de Cañería Libre

A manera de resumen, se tiene la interpretación de CBL y VDL.

Tipo de Adherencia	CBL Amplitud	Arribo de Casing VDL	Arribo de formación VDL
Tubería Libre	Alta	Fuerte	Muy débil o nada.
Buena Casing. - Cemento y Formación	Baja	Débil	Fuerte
Buena Adherencia Casing. Mala adherencia a formación	Baja	Débil	Fuerte
Micro anillos – Canales	Alta	Moderado	Moderado.
Arribo de fm. rápidas	Alta	Ausente	Fuerte.

Tabla 2.6 Interpretación Cualitativa.

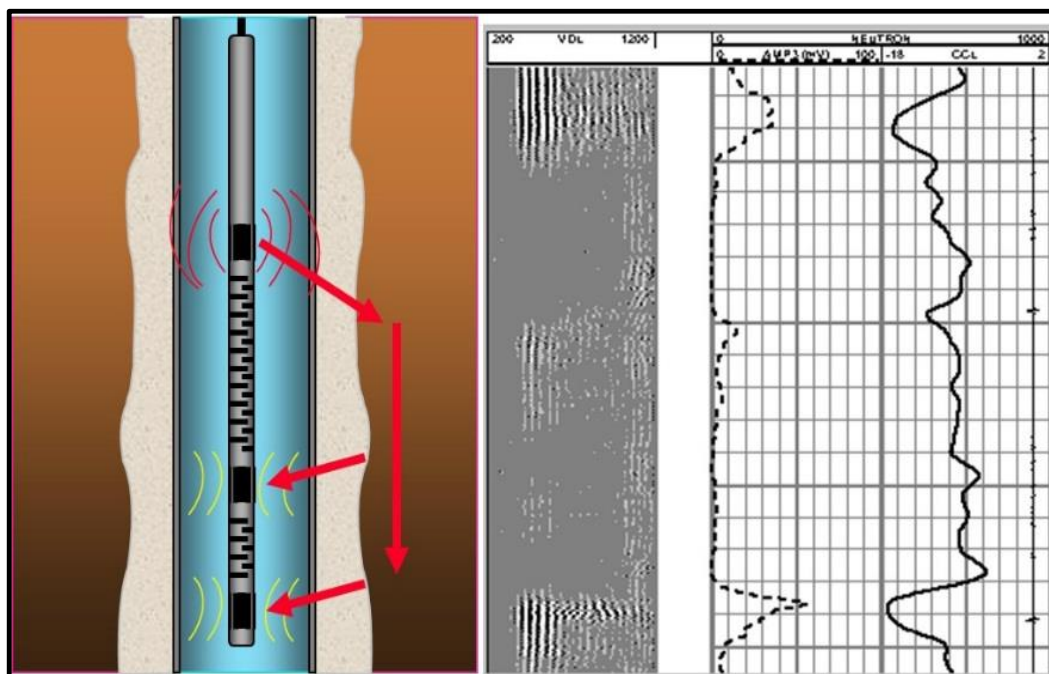


Figura 2.77 Ejemplo de Cañería con buena adherencia a casing y mala a formación.

2.3 GLOSARIOS DE TÉRMINOS BÁSICOS

- ❖ **Clinker.** Es un material que resulta de la mezcla compleja de caliza (u otros materiales con algo contenido de carbonatos de calcio), sílice, hierro y arcilla. Esta mezcla de ingredientes se muele y se calcina en hornos horizontales con corriente de aire.
- ❖ **Yeso.** Es un sulfato de Calcio que presenta dos moléculas de agua ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$). La anhidrita es un sulfato de calcio pero solo presenta una molécula de agua ($\text{CaSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$).

- ❖ **Caliza** Es el Carbonato de Calcio (CaCO_3), las calizas pueden ser las costras marinas mármoles rocas de cemento o cualquier material que tenga carbonato de calcio en mayor proporción.
- ❖ **Arcillas.** Son minerales de silicato que pueden ser aluminio, hierro o magnesio. Hay básicamente dos tipos de arcillas.
 - Arcillas Hidrables: Bentonita y Esmectita.
 - Arcillas No Hidrables: Clorita, Illita y Sepiolita.
- ❖ **Clases A y B.** Uso en poca profundidad. Composición 50% C3S, 25% C2S, 10% C3A, 10% C4AF.
- ❖ **Clase C.** Produce alta resistencia temprana debido al alto contenido de C3S.
- ❖ **Clase D, E y F.** Cementos retardados debido a molienda gruesa o inclusión de retardadores orgánicos.
- ❖ **Clase G y H.** Para uso general, compatible con la mayoría de los aditivos y puede ser utilizado en un vasto rango de temperaturas y presiones. H es más grueso – mejor retraso en pozos más profundos.
- ❖ **Clase G.** Es el tipo de cemento muy utilizado.
- ❖ **Floculación:** Una condición en la que las arcillas, los polímeros u otras partículas cargadas pequeñas se adhieren y forman una estructura frágil, un floculo. En las lechadas de arcillas dispersas, la floculación se produce después de que la agitación de las plaquetas de arcillas dispersas forma flóculos espontáneamente debido a la atracción entre las cargas negativas de frentes y las cargas positivas de los bordes.
- ❖ **Tixotropía.** La característica de un fluido, tal como el lodo de perforación, de formar una estructura gelificada con el tiempo cuando no está sujeto a cizalladura y luego fluidificarse cuando es agitado. La viscosidad del fluido tixotrópico cambia con el tiempo a una velocidad de corte constante hasta alcanzar el equilibrio. La mayoría de los lodos de perforación presenta tixotropía, que es necesaria para una perforación rápida y una elevación eficiente de los recortes de perforación y para soportar el material densificante cuando el flujo del lodo se detiene. La resistencia de gel medida en varios intervalos de tiempo indica la tixotropía relativa de un lodo a veces es deseable que la tixotropía proporcione resistencia al flujo, como para evitar o reducir las pérdidas o el flujo hacia una formación débil.
- ❖ **Solvente Mutuo.** Aditivo químico para tratamientos de estimulación que es soluble en petróleo, agua y fluidos de tratamiento con base ácida. Se utilizan de forma rutinaria en diversas aplicaciones, como la remoción de depósitos de hidrocarburos pesados, el control de humedad de las superficies de contacto antes, durante y después de un tratamiento y la prevención o descomposición de emulsiones. Un solvente mutuo de uso común es el éter Etilenglicolmonobutilo conocido generalmente como EGMBE.
- ❖ **Soda Caustica.** El nombre común del Hidróxido de Sodio (NaOH). Se utiliza en la mayoría de los lodos base agua para aumentar y mantener el pH la alcalinidad. Es un material peligroso de manipular porque es muy cáustico y emite calor cuando se disuelve en agua.

2.4 MARCO REFERENCIAL

Durante más de 100 años, se han desarrollado muchos procedimientos para los trabajos de cementación primaria, desde simples hojas de cálculo hasta complejos simuladores computarizados, que permiten integrar los datos disponibles y predecir problemas, permitiendo un ajuste fácil y rápido para optimizar los diseños.

Los problemas de floculación, coagulación y cambios tixotrópicos surgidos durante el desplazamiento del lodo en el espacio anular, fueron fenómenos muy comunes suscitados en recientes trabajos de acondicionamiento, sin llegar a la posibilidad de generar pérdidas de reservas, bajos caudales de producción y/o producción diferida y finalmente la falta de capacidad para confinar los trabajos de estimulación y /o trabajos futuros, estos fenómenos físicos fueron el punto de quiebre para analizar el sistema actual de los pre flujos y proponer mejoras y/o cambios en su formulación, lo cual se encuentra hoy en día en actitud vigilante, observando su comportamiento al interactuar dichos fluidos (Lodos y preflujos).

2.5 ELABORACIÓN DE HIPÓTESIS.

- Durante las operaciones de perforación, el lodo puede sufrir contaminaciones con *fluidos provenientes de la formación, pre flujos de los trabajos de cementación, tratamiento excesivo con arcillas comerciales*, etc. Lo que modifica sus características reológicas principales.
- El grado de contaminación del lodo se vincula más comúnmente con la geometría, la rugosidad y los agradamientos del pozo, así con la viscosidad y densidad de los fluidos presentes.
- Generalmente entre un 5% y un 10% de volumen de fluido espaciador contamina una porción de lechada de cemento. dado que la química del espaciador puede afectar las propiedades del cemento, cabe la posibilidad de que esta contaminación altera el espesamiento, el tiempo de fraguado, la reología y resistencia a la compresión de la lechada.

CAPÍTULO III

MARCO METODOLÓGICO

3.1 TIPOS, NIVEL, MÉTODO Y DISEÑO DE INVESTIGACIÓN.

El tipo de investigación es netamente operativo e ingenieril, toda vez que intenta conocer cómo ha evolucionado las distintas soluciones que permiten mejorar el aislamiento zonal en la cementación primaria, enfocándonos principalmente en una eficiente remoción de lodo.

El **Nivel** específico de la presente investigación será **aplicativo**, es decir de que sus conclusiones y recomendaciones puedan ser de utilidad para fortalecer el aislamiento zonal y el aseguramiento eficiente de la vida productiva futura de los pozos.

Con respecto al **Diseño** de la investigación, concretamente lo enfocamos en la **investigación de campo**, obteniéndose información de acuerdo a las condiciones reales de pozo.

El método de campo, consiste en la recolección de muestras in situ del sistema de Fluido de Perforación (NH₄ KPAM, dispersante base Agua), además de la recolección, análisis y evaluación de información de laboratorio, con el fin de obtener los parámetros óptimos operaciones e ingenieril de los pozos previo a los trabajos de cementación.

La **Investigación bibliográfica**, se basó en la búsqueda de información en documentos, libros, páginas de internet, todo aquello relacionado a las implementaciones de mejoras prácticas y soluciones de campos análogos al campo de estudio, además se incluyó la opinión de expertos.

3.2 SUJETOS DE LA INVESTIGACIÓN

Se utiliza fuentes de investigación primaria y secundaria para asegurar un exitoso trabajo de cementación en pozos marginales.

Al referirse de **fuentes primarias**, se trabajó en toda la información proveniente de departamento de ingeniería como: historiales de perforación, reportes, informes mensuales, partes de campo, Post Jobs de cementación directamente de los pozos seleccionados.

Las **fuentes secundarias**, se refieren a la obtención de información a través de documentos, publicaciones resúmenes, etc. Se dispuso de fuentes secundarias como: bibliotecas virtuales, libro de textos, enciclopedias y proyectos ya realizados acerca del sistema a implementar, lo que permitió tener una visión más amplia del tema.

3.3. MÉTODOS Y PROCEDIMIENTOS.

Los métodos utilizados en el presente trabajo de investigación fueron los siguientes:

Observación directa. Consiste en observar atentamente el fenómeno, hecho o caso, tomar información del estado inicial y actual de los pozos, con respecto a su integridad mecánica e hidráulica durante los trabajos de perforación, previos, durante y pos trabajos de cementación.

Recolección de datos. Es el uso de una gran diversidad de técnicas y herramientas que puedan ser utilizadas para desarrollar los sistemas de información.

Análisis e interpretación de datos. Con la información recolectada se seleccionó los pozos que cumplen con las condiciones necesarias para implementar sistemas reformulados que permitan mejorar su remoción. Este trabajo se llevó a cabo gracias a las dificultades que obtuvimos en los trabajos anteriores, lo que permitió hacer una curva de aprendizaje y reducir los cuellos de botella en aras de cumplir los objetivos primordiales que comprende los trabajos de cementación.

3.4 TÉCNICAS E INSTRUMENTOS

Finalmente se buscará liderar trabajos eficientes de acondicionamiento de pozo y a la vez establecer condiciones estándar de trabajo que sirvan como guía de mejores prácticas para futuros trabajos.

3.5 ASPECTOS ÉTICOS

En el presente trabajo de investigación el autor se reserva los derechos de la información proporcionada y además parte de esta información proviene de expertos que han realizado trabajos de cementación de pozos en campos marginales servirán de guía de mejores prácticas para trabajos futuros.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 RESULTADOS

El pozo fue perforado en la zona terciaria, ubicado en el Nor Oeste de la Cuenca Talara del Perú, cuya configuración se muestra a continuación:

Se debe mencionar que la siguiente configuración cumple con el modelo tipo utilizado en los dos pozos en estudio.

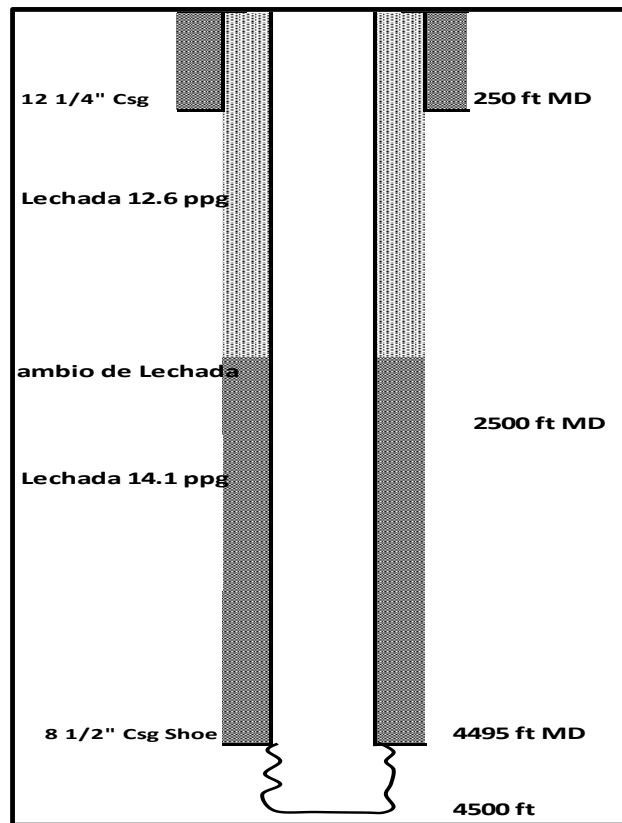


Figura 4.1 Configuración del Pozo en estudio

De acuerdo a la figura N° 4.1, se detalla la configuración del pozo tipo de estudio, cuyas características son:

- TVD final: 4500 ft.
- Dos fases de Perforación: Fase de Superficie 12 1/4" y Fase de Producción 8 1/2".
- Pozo Vertical.
- Dos fases de Cementación: Fase de Superficie 9 5/8" a profundidad de 250 ft y Fase de Producción 5 1/2" a 4495 ft.
- Cambio de lechada (TOC) a 2500 ft. Cubriendo zona objetivos primarios a profundidad promedio de 3500 ft.
- Densidad de Lechada, Relleno: 12.6 ppg y Principal: 14.1 ppg.
- Lodo en fase de Superficie: **Nativo** de densidad: 9.2 ppg y fase de Producción: **Disperso** de densidad 10.5 ppg.
- Durante la perforación, no presento problemas de pérdida de circulación ni presencia de gas.

4.1.1 Medición de pH y Ensayo de Compatibilidad: Espaciador Mecánico y Lodo de Perforación.

Para entender este ensayo, se procedió a medir el pH al **Espaciador Mecánico original**, llamado de aquí en adelante como “**EMO**”), luego se agregó el PAS desde una concentración de 1% a 2.5% para finalmente mezclarlo con lodo de perforación en una proporción 50/50.

Formulación	pH	50/50 E. Mec/Lodo	pH
EMO	8.2	Floculación	10.2
EMO + 1% PAS	4.8	Floculación	7.8
EMO + 2.5% PAS	4.5	floculación	6.1

Tabla 4.1 Compatibilidad de EMO/LODO y pH.



Figura 4.2 Floculación de EMO + (1- 2.5) % PAS y Lodo de perforación.

4.1.2 Medición de pH y Ensayo de Compatibilidad: Lavador Químico y Lodo de Perforación.

Ahora, se busca medir su valor de pH antes de agregar el PAS y después de agregar el PAS.

Formulación	pH
Agua Fresca + 2% Detergente	7.8
Agua Fresca + 2% Detergente + 1% PAS	4.5

Tabla 4.2 pH del Lavador Químico.

Tal y como sucede con el Espaciador mecánico, al agregar PAS al Lavador Químico, disminuye el valor de pH en el sistema de fluidos.

Se mezcla 50/50 Lavador Químico y Lodo de Perforación, se midió el valor de pH antes y después de agregar el PAS

Formulación	pH	50/50 E. Mec/Lodo	pH
Agua + 2% Detergente	7.8	Normal	10.2
Agua + 2% Detergente + 1% PAS.	4.5	Normal	7.6

Tabla 4.3 Compatibilidad de Lavador Químico/LODO y pH

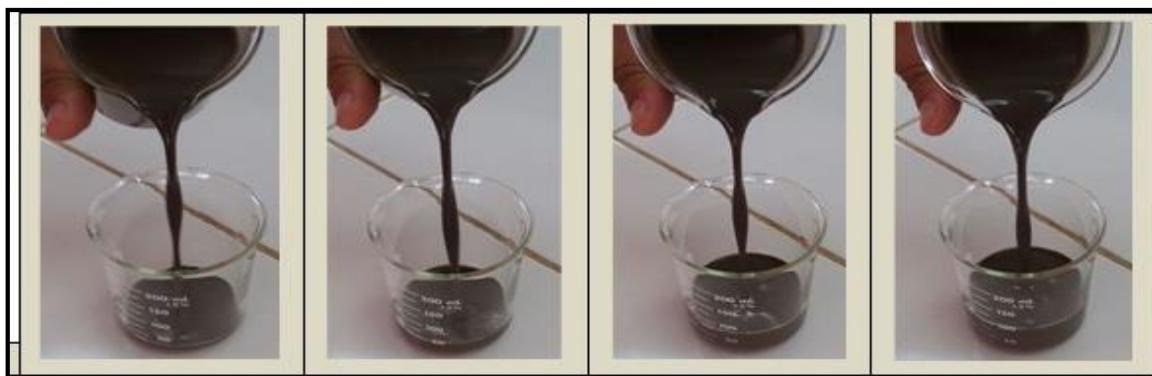


Figura 4.3 Ensayo de Compatibilidad de Lavador químico y Lodo de perforación

Se puede observar en la figura N° 20, fluidez en ambos sistemas al ser mezclados en una proporción 50/50.

4.1.3 Mejora Continua: compatibilidad entre espaciador mecánico (em modificado) y lodo de perforación.

Se pretende agregar al Espaciador mecánico, Soda Caustica (NA OH) en un rango de concentración de 0.10 – 0.50 lbs/bbl y quitar el %PAS al sistema.

Bajo esta premisa, se propone una **nueva formulación**, el cual es el siguiente:

- **Lavador Químico Modificado.**
Agua fresca + 2 % Detergente + 0.4 lb/bls NaOH.
- **Espaciador Mecánico(EM) modificado**
Agua fresca + 2% KCL + 25 lbs/ 1000 gl Gel + Baritina (densificante)+ 0.4 lb/bls de NaOH.

Se agregó NAOH al Espaciador mecánico y Lavador Químico y se verifico su valor de pH, luego de ello se mezcló 50/50 con Lodo de Perforación y se observó la compatibilidad.

Formulación	pH	50/50 E. Mec/Lodo	pH
EM mod + 0.5 lbs/bbl NAOH	12.2	Normal	11.8
EM mod+ 0.1 lbs/bbl NAOH	11.2	Normal	10.7

Tabla 4.4 Compatibilidad de EM Modificado - NAOH /LODO y pH



Figura 4.4 Ensayo de Compatibilidad de Espaciador mecánico (EM) modificado - NAOH y Lodo de perforación.

Se observa en la figura N°21, fluidez entre el sistema y el poco residuo de solidos dispersos en el mismo.

4.1.4.- Ensayo de Remoción.

La floculación generada entre los fluidos impacta en un eficiente desplazamiento y por consecuencia un mal acondicionamiento del pozo.

Las experiencias tomadas en campo, dispuso a optimizar nuestros sistemas, incorporando aditivos que reduzcan el efecto de floculación y mejore la eficiencia de desplazamiento.

Para mejorar la eficiencia de los procesos de limpieza y desplazamiento, se agregó al lavador Químico el **Surfactante** que permite disolver y dispersar el revoque de lodo y a la vez humedecer las paredes cercanas a las formaciones, esto contribuye a mejorar la adherencia del cemento.

Otro elemento es el **Solvente Mutual**, que permite romper la emulsión y mantener la interface de los fluidos uniforme, para evitar la contaminación. La nueva formulación del Lavador Químico Optimo (LQO) es el siguiente:

Agua fresca + 1.0 gls/bbl + Surfactante + 0.5 gls/bbl Solvente Mutual + 0.4 lb/bbls NaOH.

El espaciador mecánico, solo se redujo la concentración de KCL de 2.0 % a 0.5%

En conclusiones, podemos ver que al sistema del Lavador Químico se agrega productos químicos que me permitieron mejorar la adherencia del cemento hacia el casing.

Podemos ver en los gráficos posteriores, la performance de la compatibilidad de los fluidos, que conllevo a obtener una buena calidad de cemento observado en los registros de calidad de cemento (CBL - VDL).

Para el análisis de registro de calidad de cemento, se consideró intervalos de interés de 02 pozos en estudio.

4.1.5 Resultados de registro de CBL, VDL

Registro utilizando Sistema de Pre-Flujos: ESPACIADOR MECANICO Y LAVADOR QUIMICO (Optimo)

Intervalo 2200 - 2300 ft

Registro RBT

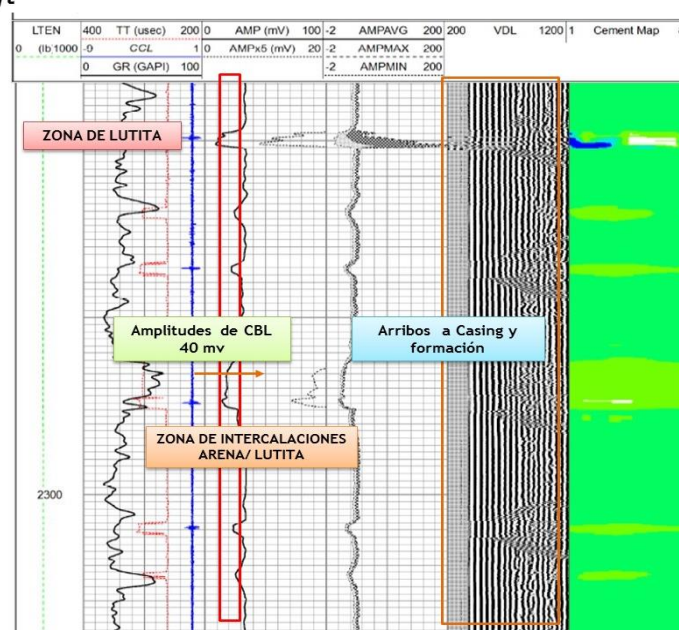


Figura 4.5 Registro CBL - VDL (Pozo ALFA).

Registro utilizando Sistema de Pre-Flujos: LAVADOR QUIMICO Y ESPACIADOR MECANIC (EMO).

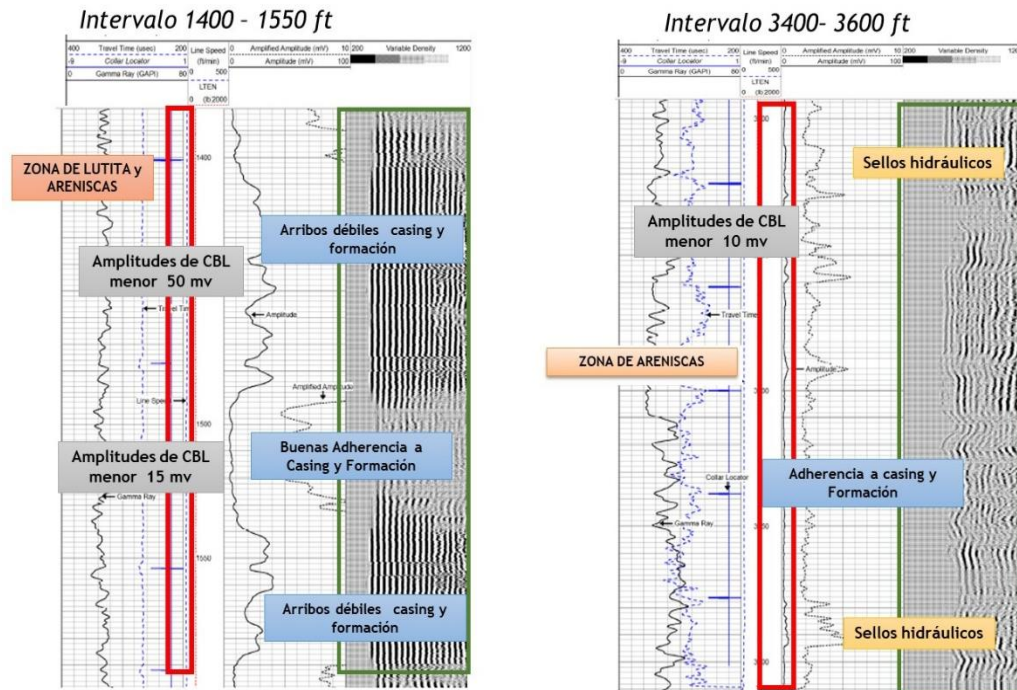


Figura 4.6 Registro CBL VDL (Pozo BETA)

4.1.6.- Evidencias de campo.



Figura 4.7 Floculación de Preflujos con Lodo de perforación en zarandas (Pozo ALFA)



Figura 4.8 Retorno en perfil plano de preflujos Óptimo en zarandas (Pozo BETA).



Figura 4.9 Muestra en superficie – Efecto de Floculación (Pozo ALFA)



Figura 4.10 Muestra en Superficie - Fluidez (Pozo BETA)

4.2 DISCUSIÓN

Según la opinión de expertos la floculación ocurre debido a una incompatibilidad química que resulta tanto con el lodo de perforación como los preflujos, generando que las partículas cargadas de menor tamaño se adhieran y formen estructuras sólidas, alterando sus propiedades reológicas y generando una ineficiente remoción de lodo que afecta la adherencia del cemento al espacio anular.

Para entender este fenómeno “**Floculación**” con mayor detalle, se realizó un ensayo de compatibilidad y remoción de los preflujos con una muestra de lodo de perforación representativa.

PROPIEDADES DEL LODO*	VALORES
Densidad(ppg)	10.2
Viscosidad de Embudo.	47 seg.
Reología: L600/ L300	51/33
Reología L200/L100	22/15
Viscosidad Plastica(Cp)	18
Yield Point (lb/100 ft ²).	15
Filtrado API (ml/30 min)	5.2
Sólidos (%)	10
Agua (%)	90
pH	9.8
Calcio(mg/l)	80
Cloruros(mg/lt)	1800

De acuerdo a las características del Lodo de Perforación, este muestra fluidez y consistencia en su estructura, siendo un lodo disperso base agua.

Si hablamos de una contaminación de fluidos, centralizaremos nuestra atención en saber cual es el efecto que surge luego de contacto directo entre los preflujos y el lodo de perforación, una manera de medirlo cuantitativamente y cualitativamente, es mediante el parámetro del pH de ambos sistemas de fluidos.

CONCLUSIONES

- ❖ Se concluye que el producto: PAS al mezclarse los preflujos con el lodo de perforación generar efectos adversos: FLOCULACIÓN.
- ❖ El sistema de Lodos de perforación mantiene una base alcalina, al estar en contacto un nuestro sistema de preflujos anterior (Base Acido), generaba floculación en su mezcla, afectando un buen acondicionamiento del pozo.
- ❖ El agregado de nuevos aditivos: Dispersante, Solvente Mutua e Hidróxido de Sodio al lavador Químico, mejora la eficiencia de desplazamiento, generando un perfil de flujo laminar efectivo descartando posibles canalizaciones.
- ❖ Se observó fluidez en los retornos de fluidos en superficie, descartando todo efecto de floculación
- ❖ Sistema Batch de Preflujos, es decir volumen intercalados (*Lavador químico + Espaciador mecánico + Lavador químico + Espaciador mecánico*). permiten sacrificar los 10 primeros barriles de bombeo de Lavador Químico y Espaciador mecánico para que los 20 – 30 últimos barriles realicen su trabajo adecuado.
- ❖ El agregado de Soda Caustica, se realiza al paso, previo al trabajo de cementación, monitoreando así el ph del fluido previo y después del agregado del producto, posteriormente se efectúa un ensayo piloto entre el lodo acondicionado con Yp: 12 lb/100 sq – ft y Vp: 18 cp. y el ESPACIADOR MECÁNICO OPTIMO, Se deja en reposo y luego se verifica el NO Efecto de floculación, decantación de sólidos y/o fluidez de este.
- ❖ Con el nuevo sistema de Preflujos, mejoró la adherencia del cemento en zonas inestables compuesto por intercalaciones arcillosas y se llevó mejor control de los retornos en superficie (Observado el registro de calidad de Cemento).

RECOMENDACIONES

- ❖ Es importante el acondicionamiento del lodo antes del trabajo de cementación, se debe tener homogenizado el pozo en su totalidad, y libre de recortes, para esto se recomienda como mínimo circular el pozo al menos dos vueltas, con un caudal entre 8 y 10 bpm.
- ❖ Es muy importante reciprocarse el casing durante el acondicionamiento del lodo, en la medida que se pueda, para mejorar la remoción del lodo viejo en el Pozo, sobre todo en densidades de lodo altas.
- ❖ Verificar continuamente el retorno de fluidos por el anular durante el desarrollo del trabajo.
- ❖ Tener una pega de contingencia para las bombas del equipo en caso sea necesario usarlas.
- ❖ Se recomienda ensayos pilotos de los preflujos y el lodo de perforación y toma de Ph para verificar la compatibilidad de los fluidos previo al bombeo.
- ❖ En zona de interés (areniscas) se utilizó lechada de bajo filtrado, para mejorar el sello hidráulico por expansión volumétrica e hidratación química por efectos de presión y temperatura.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- **Baroid The Complete Fluids Company**, “Cementación de Pozos” – Capitulo 17.
- **BJ Services**, “Curso de Cementación Primarias & Secundarias”, Abril 18 al 26, 2006 - Neuquén, Argentina.
- **Dwight K. Smith – Halliburton Research**, “Cements and Cementing”.
- **Dominique Guillot**, “Modernizing Well Cementing Design and Evaluation”, Cementing
- **Kevin Docherty**, “Mud Removal – Clearing the Way for Effective Cementing”, Schlumberger Oilfield Review, January 2016.
- **Gunnar DeBrujin**, “Evaluación Integral de las cementaciones”, Schlumberger Oilfield Review, January 2016.
- **H. Roger and J Heathman**, “Cementing Casing Equipment: Proper Selection Vital to Success”, OTC 17083.
- **Erik B. Nelson**, “Well Cementing – Mud Removal, Cap 05”
- **YPF**, “Fundamentos de Cementación” – Curso 28 y 29 de agosto de 2008.
- **Lee Dillenbeck**, “The Impact of Cementing on Proper Well Control”, Chevron ETC Drilling and Completions.
- **Mario Bellabarba**, “Aseguramiento del Aislamiento Zonal más allá de la vida productiva del Pozo”, Enero 2008.
- **Mike Crabtree**, “La lucha contra las incrustaciones – Remoción y Prevención”, Agosto 1999.
- **Schlumberger**, “Evaluación de Cemento con UltraSonic Imager”
- **Schlumberger**, “Cementing Engineering Manual – Section 8.E.1 Primary Cement Job Calculations” (Revised Sept. 1999).
- **Simon Bittleston**, “Mud Removal: Research Improves Traditional Cementing Guidelines, Cementing”
- **Spec 10^a (ISO 10426 – 1) – Cementos para pozos petroleros**. Cubre los requerimientos para la fabricación de las 8 clases de cemento para pozos petroleros: incluye los requerimientos químicos y físicos y procedimiento de pruebas físicas.
- **Spec 10D – Centralizadores de Casing**. Proporciona las especificaciones para los centralizadores que hay que usar para bajar casing.

- **RP 10B (10426 – 2) – Pruebas para Cemento Petroleros:** Indica las practicas recomendadas para realizar los ensayos a las lechadas de cemento y sus aditivos, describe procedimientos adecuados para el muestreo, para determinar la calidad de la molienda, preparación de la lechadas, determinación de la resistencia a la compresión, determinación del tiempo de bombeabilidad, tiempo de filtrado, permeabilidad y propiedades reo lógicas.
- **RP 10C – Boletín** Indica la nomenclatura de los cementos petroleros, ofrece definiciones de los términos usados comúnmente relacionados con la cementación.
- **Weatherford Latin America,** “Guia para la selección de centralizadores”

ANEXOS

ANEXO 01
MATRIZ DE BÁSICA DE CONSISTENCIA

PREGUNTAS	HIPÓTESIS	OBJETIVO
¿Es posible remover el revoque de lodo expuesto en formaciones permeables?	Los preflujos: El Lavador Químico como el espaciador mecánico permiten realizar una eficiente remoción de lodo.	Realizar los ensayos de laboratorio para determinar el tiempo eficiente de remoción.
¿El Sistema ácido de los preflujos es más eficiente que el sistema base?	Los sistemas de perforación al ser tipo polimérico, requieren de un sistema ácido para romper geles y disolver costras de lodo.	Conocer las concentraciones de los productos que comprende la formulación para sistemas ácidos y base
¿La presencia de crudo en zarandas y/o fluorescencia en zona de condiciones de reservorios dificulta su remoción?	Ante este escenario, se utiliza Solvente mutual u otros aditivos para mejorar su remoción.	Conocer las condiciones principales para remover lodo en zonas productoras.

ANEXO 02

MATRIZ GENERAL DE CONSISTENCIA

Problemas	Objetivos	Hipó tesis	Variables/ Indicadores	Metodología
Floculación	Verificar las propiedades reológicas de los fluidos que intervienen en el trabajo	Su contacto entre fluidos, puede generar alteraciones en viscosidades plasticas	VP, YP, densidad de los fluidos. Compatibilidad 50/50 – 95/05	Ensayo de compatibilidad.
Canalizaciones.	Mantener el orden reológico de los fluidos a bombear.	Fluidos de baja viscosidad plástica, genera distorsión en el perfil de flujo, ocasionando aumento de fluidos a superficie.	Viscosidad plástica,	Reómetro.
Desestabilización de lutitas	Conocer la litología de arcillas	En zona de lutitas, este fenómeno genera ensanchamiento de la geometría del hoyo.	Registro litológico, Caliper	Análisis cualitativo.
Erodabilidad del sistema de lodo	Conocer las condiciones estáticas del lodo	El Lodo expuesto en zonas inestables de geometría del hoyo, genera dificultad en su remoción.	Registro de calidad del cemento; Amplitud, adherencia.	Registro de CBL, RBT.

ANEXO 03

MATRIZ DE OPERACIONALIDAD DE VARIABLES

DEFINICIÓN CONCEPTUAL	DEFINICIÓN OPERACIONAL	DIMENSIONES	INDICADORES	ITEMS.
Variable Independiente Tipo de Litología, Eventos	La secuencia lito estratigrafía de la zona esta constituida por arena/areniscas con intercalaciones masivas de lutitas. En Lutitas inestables genera los llamados WashOut y en areniscas permeables, genera revoques.	Respuesta de Registro GR. Diámetros mayores y/o Menores a la Broca.	Contenido de Areniscas/Arenas. Contenido de Arcillas. Caliper	Perfil Litológico. Mapa estructural, Estratigráfico. Reporte de Perforación.
Variable dependiente. Propiedades del Lodo. Reologías del lodo. Formulación de los sistemas de preflujos. Volumen de los preflujos. Propiedades de los preflujos.	La compatibilidad de los fluidos, para su eficiente desplazamiento y remoción es la condición critica para los trabajos de cementación, lo cual debe ser eficiente para tener un trabajo exitoso.	Tiempo de contacto. Eficiencia de remoción. Dispersante. Desfloculante. Desemulsificante. Acu humectado.	Densidad, Viscosidad plástica y Punto de cedencia. % de Remoción. Adherencia hacia el casing y formación.	Procedimientos API. Ensayos de Laboratorio